N° D'ORDRE : 95

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

JEAN COURSAGET

1re THÈSE. — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES GALVANOMÈTRES A CADRE MOBILE DE HAUTE SENSIBILITÉ A LA TENSION. APPLICATIONS A QUELQUES PROBLÈMES DE PHYSIQUE BIOLOGIQUE.

2e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 23 décembre 1949 devant la Commission d'examen.

MM. DUPOUY..... *Président.*

BUGNARD .....
CAPDECOMME..... } *Examinateurs.*
FERT .....

PARIS
MASSON ET Cie, ÉDITEURS
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1952

FACULTÉ DES SCIENCES

Nom du candidat : **COURSAGET.**
Prénom : **Jean.**

Date de la soutenance : 23 décembre 1949.
Numéro d'ordre : 95.

COURSAGET (Jean). — Contribution à l'étude des galvanomètres à cadre mobile de haute sensibilité à la tension. Applications à quelques problèmes de physique biologique. *Paris,* Masson, 1952. In-8°, 60 p., 19 fig.

Th. Sc. Phys., Toulouse, 1949, N° 95.

COURSAGET (Jean). — Contribution à l'étude des galvanomètres à cadre mobile de haute sensibilité à la tension. Applications à quelques problèmes de physique biologique. *Paris,* Masson, 1952. In-8°, 60 p., 19 fig.

Th. Sc. Phys., Toulouse, 1949, N° 95.

COURSAGET (Jean). — Contribution à l'étude des galvanomètres à cadre mobile de haute sensibilité à la tension. Applications à quelques problèmes de physique biologique. *Paris,* Masson, 1952. In-8°, 60 p., 19 fig.

Th. Sc. Phys., Toulouse, 1949, N° 95.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548905_0099

N° D'ORDRE :
95

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

JEAN COURSAGET

1re THÈSE. — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES GALVANOMÈTRES A CADRE MOBILE DE HAUTE SENSIBILITÉ A LA TENSION. APPLICATIONS A QUELQUES PROBLÈMES DE PHYSIQUE BIOLOGIQUE.

2e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 23 décembre 1949 devant la Commission d'examen.

MM. DUPOUY..... *Président.*

BUGNARD .....
CAPDECOMME..... } *Examinateurs.*
FERT .....

PARIS
MASSON ET Cie, ÉDITEURS
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1952

UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

FACULTÉ DES SCIENCES

PERSONNEL

Administration :

MM. Dupouy..... Doyen.
Capdecomme..... Assesseur.

Honorariat :

Deltheil..... Recteur honoraire, Doyen honoraire.
Dop..... Doyen honoraire, Professeur honoraire.
Jacob..... Professeur honoraire.
Bouasse..... Professeur honoraire.
Sourisseau..... Professeur honoraire.
Clarens..... Professeur honoraire.
Camichel..... Professeur honoraire.
Mengaud..... Professeur honoraire.

Professeurs :

Roy..... Mécanique rationnelle et appliquée, Correspondant de l'Institut.
Deltheil..... Calcul différentiel et intégral.
Vandel..... Zoologie.
Cathala..... Chimie-Physique et électrochimie.
Mignonac..... Chimie générale.
Despax..... Zoologie appliquée et hydrobiologie.
Escande..... Mécanique des fluides.
Jacques..... Mathématiques générales.
Dupouy..... Physique. Correspondant de l'Institut.
Pichot..... Physique.
Gaussen..... Botanique.
Casteras..... Géologie.
Bedos..... Chimie.
Chalaud..... Botanique agricole.
Capdecomme..... Minéralogie.
Dupin..... Electrotechnique.
Teissié-Solier..... Electrotechnique.

Professeurs sans chaire :

Nouvel..... Zoologie.
Morquer..... Botanique.
Gallais..... Chimie.

Maîtres de Conférences :

Rivals..... Agriculture.
Combes..... Mathématiques.
Lesbre..... Chimie.
Fert..... Physique.
Blaizot..... Physiologie.
Durand E..... Physique théorique.
Merland..... Physique.
Brusset..... Chimie.

Chargé de Cours :

Paloques..... Astronomie.

Chargé de Conférences :

Durand G..... Astronomie.

Secrétariat :

Argilas..... Secrétaire.

A MES MAÎTRES

MONSIEUR LE PROFESSEUR L. BUGNARD

Directeur de l'Institut National d'Hygiène.

MONSIEUR LE PROFESSEUR G. DUPOUY

Correspondant de l'Institut,
Doyen de la Faculté des Sciences de Toulouse.

Hommage très respectueux
de profonde reconnaissance.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES GALVANOMÈTRES A CADRE MOBILE DE HAUTE SENSIBILITÉ A LA TENSION. APPLICATIONS A QUELQUES PROBLÈMES DE PHYSIQUE BIOLOGIQUE

Par JEAN COURSAGET

INTRODUCTION

Le galvanomètre à cadre mobile n'a guère plus d'un demi-siècle d'existence. Ce fut seulement en 1882 que d'Arsonval, en collaboration avec Deprez (9, 10), imagina cet appareil aujourd'hui si répandu dans nos laboratoires. Depuis lors, il a été l'objet de nombreux perfectionnements, suscités par les qualités remarquables qu'il possède.

Sa sensibilité au courant permet la mesure d'intensités de l'ordre de 10^{-10} ampère. Sa résistance interne est faible, ce qui, dans les circuits de résistance élevée, assure un faible coefficient de température, et, dans les circuits peu résistants, permet d'atteindre une haute sensibilité à la tension : avec la méthode décrite au chapitre III, nous avons pu mesurer des différences de potentiel inférieures à 10^{-8} volt. Il présente aussi l'avantage d'une échelle proportionnelle. Enfin son emploi est beaucoup plus aisé que celui du galvanomètre à aimant mobile, non seulement parce qu'il est insensible au champ magnétique terrestre et possède ainsi un zéro fixe, mais aussi parce que le régime d'amortissement des oscillations peut être réglé avec la plus grande facilité.

La variation du champ magnétique de l'aimant est d'une lenteur telle qu'elle ne saurait être gênante : l'aimant Alnico 2 par exemple présente une variation de flux tout à fait négligeable, évaluée à environ 0,03 pour cent par siècle.

Le domaine du galvanomètre à cadre mobile par le seul usage de shunts appropriés, s'étend sensiblement de 10^{-10} ampère à 100 000 ampères. Pour les mesures de longueur cela représente l'intervalle qui sépare 0,01 micron du quart du méridien terrestre. Il est peu de dispositifs susceptibles d'embrasser une aussi vaste étendue.

De 1882 à 1890 des progrès importants furent réalisés par Deprez et d'Arsonval puis Ayrton (1) et Mather (37), mais pendant les trente années suivantes on apporta peu d'améliorations (55). A partir de 1920, quelques chercheurs dont F. Zernicke (59) et W. J. H. Moll reprirent la question et montrèrent que l'appareil pouvait être considérablement amélioré. Sous leur influence et sous celle de A. V. Hill et de son collaborateur A. C. Downing (11, 12), un important travail théorique et technique a été entrepris qui a permis de réaliser des galvanomètres beaucoup plus sensibles. On sait le degré de perfection qu'atteignent les appareils construits par ces chercheurs.

Les méthodes nouvelles décrites dans ce travail conduisent à un gain de sensibilité particulièrement précieux en physique biologique. Elles rendent possible la mesure de variations plus discrètes de la température, de la pression osmotique, de la conductivité des tissus ce qui doit permettre de préciser le mécanisme de divers phénomènes biologiques.

CHAPITRE PREMIER

LA SENSIBILITÉ DES GALVANOMÈTRES A CADRE MOBILE

A. — Les diverses expressions de la sensibilité.

Lorsqu'on applique aux bornes d'un galvanomètre une différence de potentiel constante V_0, l'équipage mobile est sujet à un mouvement dont l'équation différentielle est :

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} + \left(\frac{\Phi_0^2}{R} + a\right)\frac{d\theta}{dt} + C\theta = \Phi_0\frac{V_0}{R} = \Phi_0 i_0, \qquad (1)$$

où θ, I, Φ_0, R, C et a représentent respectivement :

θ : l'angle du plan des spires du cadre à l'instant t avec sa position de repos,

I : le moment d'inertie de l'équipage mobile par rapport à l'axe de rotation,

Φ_0 : le flux magnétique à travers le cadre lorsque son plan est normal aux lignes de force du champ,

R : la résistance électrique totale du circuit,

C : la constante de torsion du ruban de suspension,

a : la constante d'amortissement par l'air.

Habituellement la constante a est négligeable par rapport à Φ_0^2/R si bien que l'équation (1) se réduit à :

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{\Phi_0^2}{R}\frac{d\theta}{dt} + C\theta = \Phi_0 i_0. \qquad (2)$$

Ce mouvement d'oscillation est hypoamorti ou hyperamorti suivant que R est supérieur ou inférieur à la résistance critique R_c :

$$R_c = \frac{\Phi_0^2}{2\sqrt{IC}}. \tag{3}$$

Pour la rapidité et la commodité des mesures, on est conduit à adopter le régime d'amortissement critique ou un régime très légèrement hypoamorti qui permet de déceler les frottements solides accidentels. Toutes les expressions de la sensibilité doivent être relatives à un appareil utilisé dans ces conditions.

Lorsque le mouvement de l'équipage cesse, la déviation finale θ_λ est donnée par :

$$\theta_\lambda = \frac{\Phi_0}{C} i_0. \tag{4}$$

Sensibilité au courant ou « aux ampères ». — Elle est définie par la limite du rapport de la déviation θ_λ au courant i_0 qui la produit, lorsque ce courant tend vers une valeur nulle :

$$\sigma_i = \lim \left| \frac{\theta_\lambda}{i_0} \right| = \frac{\Phi_0}{C}. \tag{5}$$

Mais cette expression ne rend pas compte du fait que l'on est pratiquement astreint à donner à la résistance du circuit une valeur voisine de la résistance critique.

Sensibilité à la tension ou « aux volts ». — C'est la valeur limite du rapport de la déviation θ_λ à la force électromotrice V_0, appliquée aux bornes du circuit de mesure lorsque V_0 tend vers zéro :

$$\sigma_V = \lim \left| \frac{\theta_\lambda}{V_0} \right| = \frac{\theta_\lambda}{R i_0}. \tag{6}$$

Si l'on tient compte de la condition d'amortissement critique, il vient :

$$\sigma_V = \frac{\theta_\lambda}{R_c i_0} = \frac{2}{\Phi_0}\sqrt{\frac{I}{C}}, \tag{7}$$

et si l'on introduit la période T_0 de l'équipage mobile en circuit ouvert :

$$\left(T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{I}{C}}\right), \tag{8}$$

σ_V s'écrit finalement :

$$\sigma_V = \frac{T_0}{\pi\Phi_0}. \tag{9}$$

Cette expression met en relief l'intérêt d'une *longue période*, résultant soit d'une faible valeur de la constante du couple de rappel soit d'un moment d'inertie élevé de l'équipage mobile.

La présence de Φ_0 en dénominateur peut sembler paradoxale. La valeur des forces électro-magnétiques agissant sur l'équipage mobile est proportionnelle à celle de ce flux; mais la valeur de la résistance critique est proportionnelle à Φ_0^2 et la sensibilité maxima à la tension d'un galvanomètre donné est obtenue quand la résistance critique R_c possède la valeur minima compatible avec la résistance du galvanomètre et celle du circuit de mesure.

Sensibilité à la puissance ou aux « watts ». — Son expression résulte de la multiplication membre à membre de (5) et (6) ou de (5) et (9); c'est donc la valeur limite du rapport du carré de la déviation θ_λ à la puissance W_0 dépensée dans tout le circuit lorsque W_0 tend vers zéro :

$$\sigma_W = \lim \left| \frac{\theta_\lambda^2}{W_0} \right| = \frac{T_0}{\pi G} \qquad (10)$$

ou encore en utilisant (8) :

$$\sigma_W = \frac{T_0^3}{4\pi^3 I}. \qquad (11)$$

Cette relation montre à nouveau l'importance d'une période élevée. A période égale, la sensibilité à la puissance est la meilleure pour l'équipage dont le moment d'inertie est le plus faible. Ainsi apparaît, pour la mesure des puissances électriques, la supériorité des équipages mobiles de faibles dimensions. Cet avantage existe aussi pour la mesure des courants et des différences de potentiel mais les expressions (5) et (9) ont l'inconvénient de ne pas le mettre en évidence.

Les expressions suivantes traduisent plus fidèlement la réalité physique.

Sensibilité « interne » à la tension et à la puissance. — La sensibilité aux volts σ_V et la sensibilité aux watts σ_W ne tiennent pas compte de la résistance propre du galvanomètre, ni de la perturbation que sa présence apporte dans le circuit de mesure. La sensibilité « interne » aux volts σ_v et la sensibilité « interne » aux watts σ_w sont relatives à la chute de tension v_0 et à la puissance dépensée w_0 dans le cadre même de l'appareil et non dans l'ensemble du circuit de mesure. Leurs définitions se déduisent donc de celles de σ_V et de σ_W en remplaçant V_0 et W_0 par v_0 et w_0. Leurs expressions :

$$\sigma_v = \lim \left| \frac{\theta_\lambda}{v_0} \right| = \sigma_V \frac{R_c}{R_G} \quad \text{et} \quad \sigma_w = \lim \left| \frac{\theta_\lambda^2}{w_0} \right| = \sigma_W \frac{R_c}{R_G} \qquad (12)\ (13)$$

où R_G est la résistance interne du galvanomètre et R_c la résistance totale du circuit de mesure en régime d'amortissement critique, définissent la *limite supérieure* de la sensibilité classique à la tension ou à la puissance, atteinte lorsque la résistance critique est égale à la résistance interne.

D'autre part, on peut établir (cf. p. 8) la relation :

$$I = A\frac{S^2}{R_G} \qquad \text{ou} \qquad I = A\frac{\Phi_0^2}{R_G H^2} \qquad (14)\ (15)$$

où S est la surface du cadre, I le moment d'inertie de l'équipage mobile et A une constante dépendant du métal et de la forme du cadre.

En utilisant les expressions de la période en circuit ouvert et de la résistance critique, la relation (15) peut s'écrire :

$$R_c/R_G = \frac{1}{4\pi A} T_0 H^2 \qquad (17)$$

et les expressions (12) et (13) deviennent :

$$\sigma_v = T_0^2 H/4\pi^2 AS \qquad \text{et} \qquad \sigma_w = T_0^4 H^2/16\pi^4 AI \qquad (18)\ (19)$$

Ces deux relations mettent en évidence l'importance d'un *champ magnétique d'intensité élevée* aussi bien pour la sensibilité à la tension que pour celle à la puissance. Si nous rapprochons (18) de (9), il apparaît que la faible valeur du flux magnétique nécessaire à une sensibilité aux volts élevée ne doit pas être la conséquence d'une intensité médiocre du champ magnétique mais des *dimensions réduites* du cadre du galvanomètre.

Cette conclusion importante peut être précisée et étendue au cas de la sensibilité au courant si l'on exprime σ_i, σ_V et σ_W en fonction de la largeur a du cadre.

Remarque. — La relation (17) montre que pour une valeur donnée du rapport R_c/R_G, la période T_0 est uniquement fonction de l'intensité H du champ magnétique.

Expression de la sensibilité en fonction des dimensions du cadre. — Soit un cadre rectangulaire de largeur a et de longueur Ka bobiné avec un fil de longueur l et de diamètre d. Soit δ la densité du métal. Le moment d'inertie I et la surface S de ce cadre peuvent s'écrire (formules 27 et 28, p. 7) :

$$I = \frac{\pi a^2 d^2 \delta l}{48}\frac{3K+1}{K+1} \qquad S = \frac{al}{2}\frac{K}{K+1},$$

ou encore, en remplaçant l par sa valeur $2na(K+1)$ en fonction du nombre n de spires :

$$I = \frac{\pi n a^3 d^2 \delta}{24}(3K+1) \qquad S = Kna^2. \tag{20}$$

On a par suite :

$$I/S = \pi d^2 \delta a(3K+1)/24K. \tag{21}$$

Si, d'autre part, on rapproche la formule (5) de la sensibilité aux ampères de la formule (8) de la période en circuit ouvert, on peut écrire :

$$\sigma_i = \frac{\Phi_0}{c} = \frac{T_0^2 H}{4\pi^2}\frac{S}{I}. \tag{22}$$

Remplaçant alors S/I par sa valeur (21), on a :

$$\sigma_i = \frac{6K}{3K+1}\frac{T_0^2 H}{\pi^3 d^2 \delta}\frac{1}{a}. \tag{23}$$

Pour des valeurs constantes de d, δ, K, T_0 et H, la sensibilité aux ampères varie comme l'*inverse de la largeur du cadre.*

De la même façon la formule (9) de la sensibilité aux volts et l'expression (20) de la surface du cadre conduisent à :

$$\sigma_V = \frac{T_0}{\pi \Phi_0} = \frac{T_0}{\pi H}\frac{1}{S} = \frac{T_0}{K\pi n H}\frac{1}{a^2}. \tag{24}$$

Multipliant (23) et (25) membre à membre, il vient :

$$\sigma_W = \frac{T_0^3}{4\pi^3}\frac{1}{I} = \frac{6T_0^3}{(3K+1)\pi^4 n d^2 \delta}\frac{1}{a^3}. \tag{25}$$

On peut enfin exprimer la résistance critique R_c en fonction de a :

$$R_c = \frac{\Phi_0^2}{2\sqrt{IG}} = \frac{T_0 H^2}{4\pi}\frac{S^2}{I} = \frac{6K^2}{3K+1}\frac{nT_0H^2}{\pi^2 d^2 \delta}a. \tag{26}$$

Tout galvanomètre sensible doit donc posséder un cadre très étroit. Un fil fin et léger est propre à assurer une meilleure sensibilité au courant (formule 23). Un cadre court avec un petit nombre de spires favorisera la sensibilité à la tension (formule 24). Mais dans les deux cas, le moment d'inertie doit être aussi faible que possible.

Dans toutes les formules précédentes on exprime les sensibilités en radian par unités électromagnétiques c. g. s. d'intensité, de tension ou de puissance, soient σ_i, σ_V et σ_W les valeurs correspondantes.

Par ailleurs, l'usage s'est répandu de désigner l'intensité i_0 (en ampères), la tension V_0 (en volts) ou la puissance W_0 (en watts) nécessaires pour produire une déviation du spot de 1 mm. sur une

échelle à 1 m. Pour passer aisément d'un système à l'autre, il est commode d'utiliser les trois relations suivantes :

$$\begin{cases} 2i_0\sigma_i = 10^{-2} \\ 2V_0\sigma_V = 10^{-11} \\ 2W_0\sigma_W = 10^{-10} \end{cases}$$

La multiplicité des expressions de la sensibilité d'un galvanomètre permet une compréhension plus complète de l'appareil, de son usage, et aussi de sa construction. Certaines de ces relations expriment mieux la complexité de l'instrument ; mais dans chaque cas particulier d'emploi, dans tout circuit donné, ces diverses expressions sont équivalentes.

B. — Réalisation des galvanomètres très sensibles.

Une longue période, un cadre de dimensions faibles et un champ magnétique intense confèrent à un galvanomètre une haute sensibilité. Mais ces qualités, qu'il faut associer, sont difficilement compatibles.

Longue période. — La valeur de la période est limitée par la commodité ou la rapidité des mesures, et aussi, pour des équipages mobiles de très faible inertie, par les difficultés de réalisation des couples directeurs.

Il est intéressant de considérer l'influence de la forme du cadre sur sa surface et son moment d'inertie. Pour les cadres rectangulaires, le rapport K de la longueur à la largeur présente une valeur optima. Si a est la longueur du petit côté, d le diamètre du fil, δ la densité du métal et l la longueur du fil bobiné, le moment d'inertie I du cadre par rapport à l'axe de rotation a pour expression :

$$I = \frac{\pi d^2 \delta l}{96(K+1)}\left[2a^2 + 3K(d^2 + 2a^2)\right].$$

d^2 est pratiquement toujours inférieur à $10^{-3} \times 2a^2$. On peut donc le négliger et il vient :

$$I = \frac{\pi a^2 d^2 \delta l}{48}\,\frac{3K+1}{K+1}. \qquad (27)$$

La surface S du cadre est :

$$S = \frac{l}{2a(K+1)}\,Ka^2 = \frac{al}{2}\,\frac{K}{K+1}. \qquad (28)$$

D'où :

$$I/S = \frac{\pi a d^2 \delta}{24} \frac{3K+1}{K}. \qquad (29)$$

La figure 1 est représentative de la relation (29). L'hyperbole est asymptote à la droite $y = +3$.

Une valeur de K voisine de 4 correspond pratiquement à la valeur limite de I/S, c'est-à-dire (formule 22) à une sensibilité au courant maximum.

Mather (37) fut le premier à montrer l'avantage d'un cadre allongé.

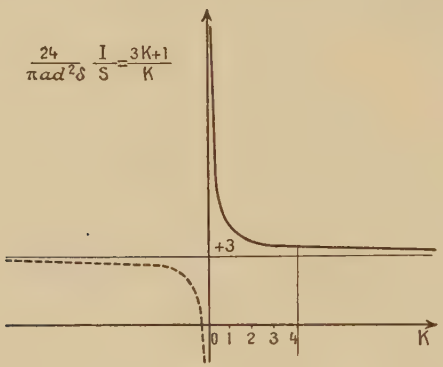


Fig. 1.

Remarque : Si ρ est la résistivité du fil, la résistance électrique du cadre a pour expression :

$$R_G = \rho \frac{4l}{\pi d^2}. \qquad (30)$$

En rapprochant (30) de (27) et de (28), on obtient par simple remplacement :

$$I = [\rho\delta(K+1)(3K+1)/3K^2][S^2/R_G], \qquad (31)$$

relation qui, sous la forme (14), nous a permis d'établir les formules de la « sensibilité interne ».

Cadres de dimensions faibles. — W. J. H. Moll (39) a mis en évidence combien cette qualité était liée à la sensibilité.

La construction des cadres minuscules est un travail délicat mais ne présente pas de difficultés insurmontables lorsque l'on dispose d'un micro-appareillage approprié. F. Combes (6) a réalisé un équipage dont la masse est de l'ordre d'une vingtaine de milligrammes. Il n'est nullement impossible de construire des cadres encore plus petits (14, 27). On est malheureusement arrêté dans cette voie par des difficultés connexes : le miroir et le couple de rappel.

Le miroir. — Il est vain de construire un équipage dans lequel le moment d'inertie du miroir occupe une place trop importante. Il faut pouvoir réduire parallèlement les dimensions du cadre et celles du miroir si l'on ne veut pas allonger inutilement la période. Mais la réalisation de bons miroirs de dimensions réduites présente de sérieuses difficultés. Le polissage crée, en effet, des tensions superficielles qui déforment la surface; une couche trempée de quelques microns d'épaisseur apparaît; la courbure de la surface finale est, en gros, inversement proportionnelle au carré de l'épaisseur du miroir. Avec des miroirs de 0,2 mm. d'épaisseur, on obtient un rayon de courbure voisin de 3 m.

M. Fouretier (19) a essayé de résoudre le problème en polissant le miroir sur les deux faces, ou en partant d'une surface convexe.

Le dépôt métallique détermine aussi des tensions superficielles, surtout si le coefficient de dilatation du métal est différent de celui du verre ce qui est le cas de l'aluminium.

Si le polissage et le dépôt métallique interdisent l'usage d'épaisseurs très faibles, les phénomènes de diffraction lumineuse limitent la réduction de la surface réfléchissante :

Le miroir plan, solidaire de l'équipage mobile, est centré sur l'axe d'une lentille convergente, fixée au tube du galvanomètre. La fente source est placée dans le plan focal de cette lentille; son image se forme dans ce même plan sur la réglette graduée. Le miroir joue pour le faisceau lumineux le rôle d'un diaphragme et donne naissance à des franges de diffraction au niveau de l'image. D'après le principe de Huygens-Fresnel, la vibration diffractée en un point du plan image a pour expression une intégrale de la forme :

$$S = k \int\int_S \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{\delta}{\lambda} \right) dS,$$

où δ représente la différence des chemins optiques entre les rayons issus respectivement du centre du miroir et de l'élément dS de sa surface S.

L'image de la fente présente une série de franges noires équidistantes parallèles à la fente. Si f est la distance focale de la lentille, λ la longueur d'onde utilisée, les premières franges noires, de part et d'autre du maximum central, sont distantes de :

$$\begin{cases} \Delta_c = 1{,}22 \lambda f / r \\ \Delta_R = 2 \lambda f / a \end{cases}$$

dans le cas, respectivement, d'un miroir circulaire de rayon r et d'un miroir rectangulaire dont le côté a est perpendiculaire à la fente.

Par exemple, un miroir rond de 3 mm. de diamètre conduit, pour $\lambda = 0{,}6\ \mu$ et $f = 100$ cm., à une tache de largeur $\Delta = 0{,}5$ mm. Si on le remplace par un miroir rectangulaire de même surface de

$2 \times 3{,}5$ mm., le moment d'inertie est réduit aux 6/10 de sa valeur, mais la tache de diffraction atteint 0,6 mm.

Les miroirs rectangulaires permettent, à surface égale, de réduire de 10 o/o le moment d'inertie du miroir, sans élargir la tache de diffraction. Une réduction plus importante s'accompagne inévitablement d'un élargissement de cette tache. Il existe donc une valeur inférieure limite au moment d'inertie du miroir, et par suite, à celui du cadre.

Le couple de rappel. — Le couple de rappel, plus encore que le miroir, empêche de réaliser des équipages très petits. Trois facteurs contribuent à limiter les possibilités de diminution du couple de rappel : la résistance électrique, le mouvement brownien, le « magnétisme » du cadre et les phénomènes d'hystérésis.

La résistance électrique. — Le problème consiste à obtenir des constantes de torsion faibles sans résistance électrique élevée. On choisit un métal ou un alliage possédant une résistivité électrique et un module de torsion faibles : l'argent remplit ces deux conditions ; il a été le premier employé ; actuellement on lui préfère les alliages de cuivre avec le phosphore, le béryllium, la silice, etc. Les rubans sont supérieurs aux fils ronds et, pour une charge donnée, il existe pour chaque métal un aplatissement optimum du ruban. Alors que la constante de torsion d'un fil rond est donnée par la formule :

$$C = \mu \frac{\pi r^4}{2l} \text{ dyne-cm/radian}$$

où l est la longueur du fil, r son rayon et μ le module de rigidité, celle d'un fil très aplati apparaît comme la somme d'un terme dû à la torsion pure et d'un terme dû à la tension F du fil (41) :

$$C = \frac{1}{3} \frac{s}{l} \left(\mu s \frac{b}{a} + \frac{F}{4} \frac{a}{b} \right) \qquad (32)$$

où s, a, b représentent la section, la largeur et l'épaisseur du fil. L'aplatissement optimum se déduit immédiatement de (32) :

$$a/b = 2\sqrt{\mu s/F}.$$

A section, donc à résistance égale, le ruban d'aplatissement optimum a souvent une constante de torsion inférieure au dixième de celle du fil rond.

Dans une nouvelle étape, on a renoncé à faire jouer au ruban de suspension le rôle de conducteur de courant. La formule (32) met, en effet, en évidence qu'un ruban a une constante de torsion plus faible s'il n'est pas tendu. Pour les faibles sections, la différence est considérable. D'après (32) la constante de torsion d'un ruban non tendu travaillant à la torsion pure est :

$$C = \frac{1}{3} \mu \frac{s}{l} b^2. \qquad (33)$$

Pour un ruban travaillant à la flexion, la valeur de C est très légèrement inférieure. Ainsi un ruban d'argent (module de rigidité $= 2\,500$ kg/mm^2) de $1\ \mu \times 160\ \mu$ chargé à 1 kg/mm^2 (soit un équipage de 160 mg.) a d'après (32) une constante de torsion de $3{,}3.10^{-3}$ dyne-cm/radian ; celle du même ruban non chargé est $1{,}3.10^{-3}$ pour un travail à la torsion et $0{,}8\ 10^{-3}$ pour un travail à la flexion.

En général ces rubans conducteurs sont en or, parce que l'on peut obtenir facilement des rubans minces de ce métal et aussi, parce qu'il s'altère peu. Dans le galvanomètre du type Zernicke construit par Moll (39, 40) les rubans d'or ont une épaisseur voisine de $0{,}4\ \mu$. Ils présentent une constante de torsion de l'ordre de 3.10^{-4} dyne-cm/radian soit environ 10 pour cent de celle du fil de suspension.

Ce dernier n'a plus besoin d'être conducteur. On choisit en général le quartz qui présente, à la fois, une charge de rupture (120 kg/mm^2) et un module de rigidité ($\mu = 3\,000$ kg/mm^2) très élevés.

Ce procédé n'est pas sans inconvénients. En particulier, il rend l'équipage beaucoup plus fragile et très délicat à construire. En outre, l'or des rubans doit être très pur : pour des titres usuels de 950/1 000 la résistivité est fréquemment deux ou trois fois supérieure à celle de l'or pur. Enfin, le couple introduit par les rubans doit rester faible par rapport à celui du fil de suspension ; sans cela le zéro est instable et la sensibilité varie.

Nous avons apporté une solution nouvelle à ce problème : par l'emploi d'un couple magnéto-cristallin, on peut obtenir des couples de rappel plus faibles sans accroître ni la résistance électrique ni la fragilité (cf. chap. II).

Le mouvement brownien. — Ce phénomène apparaît comme une limite à la sensibilité qu'il est possible d'atteindre. G. Ising (29, 30) a traité ce problème en 1926 puis en 1932, tandis que dans l'intervalle Ornstein (42) et ses collaborateurs en ont fait une étude expérimentale (1). Pour un équipage à l'amortissement critique, les déplacements du spot ont, à la température ordinaire, une valeur quadratique moyenne inversement proportionnelle à la constante C du couple de rappel. Pour $C = 10^{-6}$ c. g. s., $\sqrt{\overline{\Delta^2}} = 0{,}2$ mm. La diminution du couple de torsion entraîne donc un accroissement des fluctuations browniennes du spot.

(1) E. Hochard (28) a enregistré, quelques années plus tard, les oscillations browniennes d'un spot dans des conditions particulièrement bonnes : un support de longue période propre éliminait les microséismes, tandis qu'un couplage ingénieux par photo-relais et transformateur entre deux galvanomètres amplifiait très fidèlement les fluctuations du premier ; depuis 1932 divers auteurs ont abordé cette question (2, 17, 48, 49, 50).

Le « magnétisme » du cadre. — Le fil utilisé pour la construction du cadre doit être diamagnétique. En fait, il s'avère que cette condition est impossible à réaliser. Même si l'on part de métal très pur, et, qu'après décapage de gros fil, on termine avec des filières de diamant le fil n'est pas exempt de ferromagnétisme, soit par suite des impuretés du métal, soit à cause des inévitables souillures (53, 55).

Un travail de recherche a été entrepris en Angleterre (3) et, plus récemment, des méthodes de désaimantation partielle par nettoyage ou recuit ont été proposées (5, 13, 51). Ce phénomène impose une limite inférieure au couple de rappel et une limite supérieure à l'intensité du champ magnétique.

Champ magnétique intense. — Depuis quelques années les propriétés des matériaux magnétiques ont été considérablement améliorées. Pour les aciers au carbone le champ magnétique coercitif était voisin de 50 œrsteds. Il est de 210 œrsteds pour les aciers au cobalt (40 pour cent). Récemment les alliages d'argent (81 pour cent) ont permis d'atteindre 6 000 œrsteds.

L'énergie externe $(H.\ B.)_{max}$ est passée de 180 000 ergs/cm^3 (acier au carbone) à 940 000 (cobalt 40 o/o), puis à 4 500 000 (alnico 5). Ces progrès importants (21) permettent de réaliser des champs plus intenses avec des aimants de volume plus faible.

Malheureusement, le « magnétisme » des cadres limite l'emploi de ces champs magnétiques. Ce phénomène se manifeste sous trois formes principales :

1° Un cadre suspendu par un fil sans torsion (cocon) dans un champ magnétique intense possède une orientation privilégiée variable avec les traitements magnétiques, mécaniques ou thermiques subis par le cadre.

2° La période d'un galvanomètre en circuit ouvert varie avec le champ magnétique (le couple « parasite » est, en première approximation, proportionnel au carré de l'intensité du champ). Elle ne reprend pas sa valeur primitive quand, après avoir augmenté le champ magnétique pendant un certain temps, on lui redonne sa valeur initiale.

3° Après une déviation importante et prolongée, le spot ne revient pas au zéro.

Toutes ces manifestations ne s'expliquent pas par la seule présence d'impuretés ferro-magnétiques soumises à des cycles d'hystérésis. Le paramagnétisme, l'anisotropie magnétique cristalline semblent y jouer un rôle important. Certains métaux ou alliages sont particulièrement favorables : l'or est un des meilleurs, mais sa densité accroît beaucoup le moment d'inertie du cadre ; le cuivre est amélioré par un recuit 2 heures à 900° (7), tandis qu'un traitement identique est inefficace sur l'argent.

L'usage d'un champ radial dans l'entrefer est recommandé, mais la présence d'impuretés paramagnétiques ou ferromagnétiques modifie la topographie du champ.

Un des meilleurs moyens d'étudier l'importance de ces phénomènes sur un galvanomètre est d'établir la courbe $\sigma = f(H)$ représentant les variations de la sensibilité au courant en fonction de l'intensité du champ magnétique. La figure 6, page 34, représente trois courbes $\sigma_i = f(H)$ obtenues avec trois cadres de nature différente.

C. — L'amplification de la sensibilité. Ses limites.

Les divers facteurs de sensibilité sont difficilement compatibles : l'impossibilité de réaliser des miroirs d'assez faible inertie empêche de construire des cadres de dimensions très réduites. Une longue période et un équipage minuscule exigent un couple de rappel trop faible : il introduit une résistance électrique trop élevée et est irréalisable en présence d'un champ magnétique intense.

On peut avoir recours à l'amplification de la sensibilité. Celle-ci peut être réalisée de trois façons différentes :

La première consiste à améliorer les conditions de lecture des déviations du spot lumineux. La stabilité du zéro est alors essentielle et il faut s'assurer des qualités magnétiques du cadre, des qualités élastiques du ruban de suspension et de la parfaite symétrie de l'équipage mobile.

L'amplification des déviations pourrait être assurée par un dispositif purement optique si la définition du système le permettait. C'est en général irréalisable. On peut, par contre, transformer la déviation du spot lumineux en force électromotrice qui est appliquée à un second galvanomètre moins sensible ; cette dernière méthode a été très étudiée et semble avoir été particulièrement heureuse.

F. Zernicke (59), dès 1921, a utilisé un relais thermoélectrique ; Moll et Burger (39, 40), puis A. V. Hill (22) en ont poursuivi le perfectionnement théorique et pratique. Par l'usage d'une cellule photoélectrique (22, 23, 24, 34) on peut atteindre de plus grandes vitesses d'indication (22). Ce procédé offre néanmoins plusieurs inconvénients : L'exactitude de la lecture finale est liée au bon fonctionnement de deux galvanomètres et à la linéarité de la liaison thermo ou photoélectrique. Les fluctuations inévitables dans la brillance de la source lumineuse, l'inégale sensibilité de la surface des cellules photoélectriques doivent être compensées par des dispositifs spéciaux (18, 33).

Le deuxième type de solution consiste à disposer de nouvelles variables dans la construction du galvanomètre ; c'est ainsi que Moll et Burger (40), dès 1925, fixèrent à l'équipage un corps paramagnétique situé dans un champ magnétique contrôlable ; par ce procédé,

il est possible de diminuer le couple de rappel sans augmenter la résistance. Notre « galvanomètre à cristal » a été conçu dans un esprit analogue. L'action amplificatrice est réalisée au sein même du galvanomètre.

La troisième méthode a été récemment développée ; elle utilise aussi une cellule photoélectrique mais son courant, au lieu d'être transmis à un second galvanomètre est, le cas échéant après amplification ou transformation, appliqué au même galvanomètre.

Ce procédé a été utilisé par W. L. Walton (52), en 1925, pour accroître la sensibilité et par A. V. Hill (26) pour réduire la période. Peu après, un collaborateur de Hill, Otto H. Schmitt (46) a exposé la généralité de la méthode et a réalisé des circuits électroniques pour son application. Non seulement la sensibilité peut être considérablement accrue, mais il est possible de faire varier toutes les caractéristiques de l'appareil. Mais là encore, il est nécessaire d'assurer une proportionnalité rigoureuse entre les déviations du spot et le courant débité par la cellule photo-électrique. En outre, le circuit d'amplification électronique peut introduire des perturbations.

Dans le « galvanomètre à cadre couplé » (cf. chap. III) nous avons surmonté ces deux difficultés. Les variations de la cellule photo-électrique et du circuit électronique sont sans influence sur l'exactitude de la lecture.

Les limites de la sensibilité. — Longtemps les galvanomètres eurent des zéros instables à cause d'une construction défectueuse (mauvais rubans de suspension, « magnétisme » des cadres, dissymétrie de l'équipage, etc.) et leur sensibilité fut illusoire.

Lorsque l'on sut réduire ces défauts de stabilité, l'amplification des mouvements du spot montra l'existence inévitable de mouvements irréguliers de part et d'autre de la position d'équilibre.

En 1921, F. Zernicke (59), construisant des équipages de taille très réduite en vue d'une grande sensibilité, constata la présence de « perturbations microsismiques » dans le comportement du spot lumineux.

En 1925, Moll et Burger (40) rencontrèrent le même phénomène avec deux galvanomètres reliés par une thermo-pile.

Un an plus tard, Ising entreprit l'étude détaillée des résultats de Moll et Burger. S'appuyant sur un travail antérieur (47), il montra bientôt qu'il ne s'agissait nullement de microséismes mais bien des fluctuations browniennes du premier galvanomètre.

En 1927, Ornstein, Burger, Taylor et Clarkson (42) confirmèrent expérimentalement les résultats théoriques de Ising.

Ce dernier reprit la question en 1932 et étudia (30) comment la sensibilité des galvanomètres était limitée par le mouvement brownien.

Lorsqu'un équipage mobile est maintenu dans une certaine position par une force de torsion C, il existe des déplacements de part et d'autre de cette position. Leur valeur moyenne est :

$$\overline{\delta\theta} = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{C}}\,(^1). \qquad (34)$$

D'autre part, pour un galvanomètre à l'amortissement critique, la sensibilité au courant σ_i et la sensibilité à la tension σ_v peuvent s'écrire : $\sigma_i = \sqrt{R_c T_0/\pi C}$, $\sigma_v = \sqrt{T_0/\pi C R_c}$.

En introduisant (34) on obtient les valeurs des courants et des forces électromotrices équivalentes au mouvement brownien :

$$\overline{\delta_i} = \sqrt{2\pi\varepsilon/RT_0}, \qquad \overline{\delta_v} = \sqrt{2\pi\varepsilon R/T_0}. \qquad (35, 36)$$

Soit à 18° C, en ampères et en volts :

$$\overline{\delta_i} = 1{,}12.10^{-10}/\sqrt{RT_0}, \qquad \overline{\delta_v} = 1{,}12.10^{-10}\sqrt{R/T_0} \quad (37, 38)$$

Si on admet que les plus petites déviations lues avec certitude sont quatre fois plus grandes, les valeurs minima détectables du courant et de la tension sont :

$$\overline{\delta_{i_{min}}} = 4{,}48.10^{-10}/\sqrt{RT_0}, \qquad \overline{\delta_{v_{min}}} = 4{,}48.10^{-10}\sqrt{R/T_0}. \qquad (30, 40)$$

La réalisation artificielle de l'amortissement critique peut permettre (cf. chap. III) de réduire ces valeurs. Néanmoins l'existence d'une telle limite permet de comparer utilement divers galvanomètres (39). Grâce aux possibilités d'amplification dont on dispose, le plus faible courant mesurable n'est pas fonction de la sensibilité du galvanomètre au sens habituel, mais bien de l'importance des fluctuations du spot par rapport à celles du mouvement brownien.

CHAPITRE II

LE GALVANOMÈTRE A CRISTAL

En 1931, M. Dupouy a montré que la sidérose ou carbonate de fer possédait une anisotropie magnétique élevée (15). Un tel cristal, convenablement orienté dans un champ magnétique *uniforme*, est soumis à un couple. Sa valeur, pour des cristaux de quelques milligrammes et des champs magnétiques voisins de 100 œrsteds, est de l'ordre de celle des couples directeurs des galvanomètres sensibles.

(1) — A 18° C, $\varepsilon = 2{,}00.10^{-14}$ erg.

L'utilisation de cet effet magnéto-cristallin nous a permis de réaliser des appareils qui possèdent une haute sensibilité, peuvent être employés dans des conditions très diverses et sont aussi robustes que des appareils dix fois moins sensibles de type classique. Le principe de cette méthode a été exposé récemment (16).

A. — Principe et étude théorique de l'appareil.

Un cristal de sidérose est fixé sur l'axe de l'équipage mobile en un point où l'on peut établir un champ magnétique uniforme d'intensité réglable. L'orientation du cristal par rapport au champ est bien définie. Le couple magnéto-cristallin est nul dans la position de repos. Pour de petites rotations de l'équipage, il prend une valeur proportionnelle à l'angle d'écart et il tend à écarter l'équipage de sa position d'équilibre. Ainsi, le couple magnéto-cristallin se retranche du couple de rappel exercé par le ruban de suspension.

Si C_M et C_S sont les constantes de ces deux couples et si l'amplitude des oscillations reste faible, l'équation du mouvement du galvanomètre s'écrit (cf. formule 8) :

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{\Phi_0^2}{R}\frac{d\theta}{dt} + (C_S - C_M)\theta = \Phi_0 i_0. \qquad (1)$$

Toute variation de C_M entraîne un changement de sensibilité, de période et de résistance critique Une variation conjuguée de C_M et de la valeur Φ_0 du flux magnétique, au moyen du shunt habituel, permet d'accroître la sensibilité à résistance critique constante ou de réduire la résistance critique sans modifier la sensibilité au courant. En outre, on peut donner au couple directeur des valeurs très inférieures à celle du couple de torsion du ruban. La résistance interne ne change pas.

Couple magnéto-cristallin. — Un cristal uniaxe d'une substance paramagnétique de masse m et dont l'axe principal de symétrie fait un angle θ avec les lignes de force d'un champ magnétique uniforme d'intensité H_M est soumis à un couple de moment :

$$\Gamma_M = \tfrac{1}{2} m(\chi_1 - \chi_2)H_M^2 \sin 2\theta. \qquad (2)$$

χ_1, coefficient d'aimantation suivant l'axe principal est pour la sidérose $104{,}5.10^{-6}$ à 16°7 C.

χ_2, coefficient d'aimantation dans une direction perpendiculaire, est pour le même cristal, $56{,}6.10^{-6}$ à 16°7 C.

Il suffit d'étudier la variation de Γ_M de o à π. Il s'annule pour $\theta = o$, $\theta = \frac{\pi}{2}$ et $\theta = \pi$ (fig. 2a). $\theta = o$ et $\theta = \pi$ représentent une posi-

tion d'équilibre stable car, à leur voisinage, les variations de θ et de Γ_M sont de même signe :

$$d\Gamma_M = \frac{1}{2} m(\chi_1 - \chi_2)H_M^2 d \sin 2\theta \# m(\chi_1 - \chi_2)H_M^2 d\theta.$$

Par contre, $\theta = \frac{\pi}{2}$ correspond à une position d'équilibre instable :

$$d\Gamma_M = \frac{1}{2} m(\chi_1 - \chi_2)H_M^2 \cos \pi \times 2d\theta = -m(\chi_1 - \chi_2)H_M^2 d\theta.$$

Un tel cristal présente donc deux positions d'équilibre stable, lorsque son axe principal est parallèle aux lignes de force du champ magnétique.

Lorsque cet axe est perpendiculaire aux lignes de force du champ, l'équilibre est instable ; pour des rotations assez faibles du cristal autour de cette dernière position, on peut remplacer sin 2θ par 2θ, et le couple magnéto-cristallin, proportionnel à l'angle d'écart, a pour valeur :

$$\Gamma_M = -m(\chi_1 - \chi_2)H_M^2 \theta = -C_M \theta. \tag{3}$$

Avec :

$$C_M = m(\chi_1 - \chi_2)H_M^2. \tag{4}$$

C'est cette position que nous utilisons dans le galvanomètre.

Couple magnéto-cristallin et couple de torsion. — Suspendons par un fil, de constante de torsion C_S, un cristal de sidérose dans une région où peut être établi un champ magnétique uniforme d'intensité H_M. En l'absence de ce champ, le cristal présente une certaine orientation correspondant à une torsion nulle du fil. Soit θ_0 l'angle aigu formé par la direction OA de l'axe ternaire et la direction OH_M du champ magnétique (fig. 2*b*). Lorsque l'on établit le champ, le cristal tourne d'un angle ρ défini par l'égalité du couple magnéto-cristallin et du couple de torsion du fil ; la nouvelle direction OA′ de l'axe ternaire fait avec OH_M l'angle $(\theta_0 - \rho)$ si bien que cette égalité s'écrit d'après (2) :

$$\frac{1}{2} m(\chi_1 - \chi_2)H_M^2 \sin 2(\theta_0 - \rho) = C_S \rho. \tag{5}$$

ρ pourra être déterminé, par exemple, en construisant la sinusoïde (S) et la droite (Δ) d'équations respectives :

$$\begin{cases} y = \sin 2(\theta_0 - \rho) \\ y = \dfrac{2C_S}{m(\chi_1 - \chi_2)H_M^2} \rho \end{cases} \tag{6}$$

et en relevant l'abscisse du point d'intersection (fig. 2*b*).

Le cas particulier de $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ est celui qui nous intéresse ici : avant l'établissement du champ magnétique, la direction de l'axe ternaire du cristal est normale à celle du champ (fig. 2*c*) ; il s'agit de la position d'équilibre instable envisagée au paragraphe précédent. La droite (Δ) et la sinusoïde (S) correspondantes passent par l'origine O ; lorsque l'on établit le champ, il n'y a rotation du cristal que si la

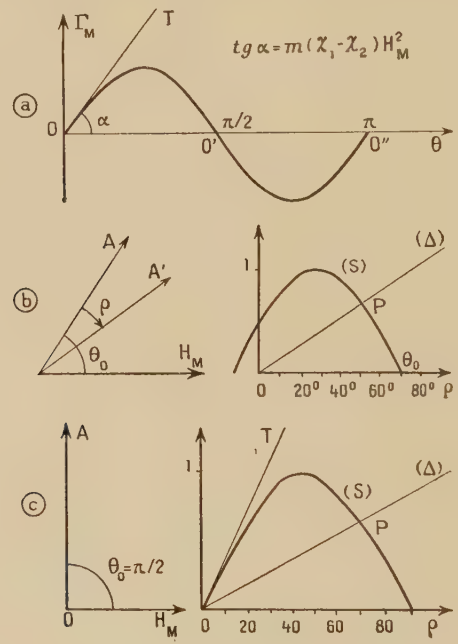


Fig. 2.

droite (Δ) a une pente inférieure à celle de la tangente inflexionnelle OT à (S) ; cette condition s'exprime par l'inégalité :

$$2C_S/m(\chi_1 - \chi_2)H_M^2 \leqslant 2. \qquad (7)$$

Si, pour un cristal et un fil de suspension donnés, H_M n'atteint pas une valeur suffisante pour satisfaire la relation (7), aucune rotation ne se produira. On a alors :

$$C_S \geqslant m(\chi_1 - \chi_2)H_M^2.$$

Et si l'on écarte le cristal de cette position d'un angle θ assez petit pour que l'on puisse assimiler sin. 2θ avec 2θ, le couple de rappel dû au fil de suspension est supérieur au couple magnéto-cristallin

tendant à l'écarter de la position d'équilibre. Le couple résultant $C\theta$ est égal à leur différence, soit :

$$C\theta = [C_s - m(\chi_1 - \chi_2)H_M^2]\theta = (C_s - C_M)\theta. \qquad (8)$$

On dispose ainsi d'un couple de rappel proportionnel à l'angle d'écart et susceptible de prendre des valeurs aussi faibles que l'on désire. Il suffit de faire varier l'intensité du champ magnétique H_M. Ce couple, appliqué à l'équipage mobile d'un galvanomètre, conduit à l'équation du mouvement (1). *La position de repos, tout comme dans un appareil ordinaire, correspond à une torsion nulle du ruban de suspension.*

Le champ H_M au milieu duquel se meut le cristal doit être indépendant du champ principal du galvanomètre pour que l'on puisse régler l'orientation du cristal et réaliser indépendamment des variations du champ H_M et du flux à travers le cadre.

Pour des valeurs croissantes de H_M, le couple directeur résultant prend des valeurs de plus en plus faibles et s'annule pour :

$$H_{M\lambda} = \sqrt{C_s/m(\chi_1 - \chi_2)}.$$

En fait le zéro de l'appareil n'est plus défini lorsque H_M, sans atteindre la valeur limite H_M, en est suffisamment voisin pour que les couples « parasites » jouent un rôle notable. Il en résulte une limite de l'augmentation de la sensibilité par l'action du couple magnéto-cristallin. Néanmoins, les appareils construits ont montré qu'il était possible de réduire le couple directeur à une valeur égale à 1/10 de celle du couple de torsion du ruban sans nuire à la stabilité du zéro.

Sensibilité, période et résistance critique réglables. — Les variations simultanées du couple directeur $C\theta$ et du champ magnétique principal H offrent deux possibilités :

a) L'accroissement de la sensibilité sans changement de la résistance critique, c'est-à-dire sans modification du circuit de mesure. Les variations de la constante C du couple de rappel et de l'intensité H du champ magnétique doivent être liées par la relation :

$$\Phi_0^2/\sqrt{C} = 2R_c\sqrt{I}. \qquad (9)$$

La valeur de la sensibilité est alors définie par celle du couple directeur :

$$\sigma_i = \Phi_0/C = \sqrt{2R_c\sqrt{I}} \times C^{-\frac{3}{4}} \qquad (10)$$

$$\sigma_V = \Phi_0/CR_c = \sqrt{2\sqrt{I}/R_c} \times C^{-\frac{3}{4}} \qquad (11)$$

Si on divise le couple par dix, la sensibilité au courant et la sensibilité à la tension sont multipliées par 5,6.

b) La diminution de la résistance critique sans changement de la sensibilité au courant. On a les relations :

$$\begin{cases} R_c = \Phi_0^2/2\sqrt{IC} = (\sigma_i^2/2\sqrt{I}) \times C^{\frac{3}{2}} & (12) \\ \sigma_V = \Phi_0/CR_c = (2\sqrt{I}/\sigma_i) \times C^{-\frac{3}{2}} & (13) \end{cases}$$

Si le shunt permet une assez large variation du champ magnétique, une réduction par un coefficient dix du couple de rappel entraîne une multiplication par 14,1 de la sensibilité à la tension.

Dans les deux cas envisagés, la sensibilité aux watts conserve la même expression :

$$\sigma_W = \sigma_i \times \sigma_V = \Phi_0^2/C^2R_c = 2\sqrt{I} \times C^{-\frac{3}{2}}. \qquad (14)$$

A l'amortissement critique, la puissance nécessaire pour obtenir une déviation donnée est indépendante de l'intensité du champ magnétique.

B. — Réalisation du galvanomètre.

Calcul de l'appareil. — Pour construire un galvanomètre de caractéristiques données, il est important de déterminer un certain nombre de facteurs :

— La constante de torsion du ruban de suspension . . . C
— L'intensité du champ magnétique . . . . . H

— Les caractéristiques du cadre :

Nature du métal : densité. . . . . δ
résistivité . . . . . ρ
Diamètre du fil. . . . . d
Longueur du fil. l
Largeur du cadre . . . . . a
Rapport des longueurs du grand et du petit côté . . K

Nous avons montré l'intérêt d'une valeur voisine de 4 pour la constante K.

D'autre part, le métal idéal pour la construction du cadre est un métal léger et bon conducteur : l'aluminium semble être le métal de choix ; malheureusement, l'impossibilité d'effectuer de bonnes soudures avec ce métal en interdit l'emploi (1). L'argent et le cuivre sont

(1) L'usage d'un fil « Wollaston » cuivre-aluminium fournit cependant une solution (cf. chap. III).

à peu près équivalents : nous avons choisi le cuivre sacrifiant une plus faible résistance à une plus faible inertie.

On ne dispose plus dès lors que de cinq facteurs : C, H, d, l et a. Ils sont liés par les relations exprimant les qualités exigées de l'instrument : la période T_0, la résistance du cadre R_G, la résistance critique R_c et la sensibilité (par exemple la sensibilité à la tension σ_V).

Calcul de C. — Les expressions $T_0 = 2\pi\sqrt{I/C}$, $\sigma_V = T_0/\pi\Phi_0$ et $R_c = \Phi_0^2/2\sqrt{IC}$ de la période, de la sensibilité à la tension et de la résistance critique permettent d'écrire :

$$C = T_0/\pi R_c \sigma_V^2. \qquad (15)$$

Calcul de H. — Nous avons établi (chap. Ier, formule 17) la relation :

$$T_0 H^2 \frac{1}{4\pi A} = R_c/R_G. \qquad (17)$$

Soit :

$$H^2 = 4\pi A \times R_c/R_G T_0. \qquad (18)$$

Avec un cadre en cuivre et $K = 4$, on a :

$$H^2 = 2{,}45 \cdot 10^5 R_c/R_G T_0. \qquad (19)$$

Pour une valeur donnée du rapport R_c/R_G, *le champ magnétique est seulement fonction de la période* T_0 *de l'instrument.*

Calcul du cadre. — Une des trois variables d, l, a peut être choisie arbitrairement. On a :

$$\Phi_0 = T_0/\pi\sigma_V. \qquad (20)$$

Associée à (18) cette formule permet d'obtenir la surface S du cadre :

$$S = \frac{\Phi_0}{C} = \sqrt{\frac{1}{4\pi^3 A}}\sqrt{\frac{R_G}{R_c}\frac{T_0^3}{\sigma_V^2}}. \qquad (21)$$

On peut également écrire :

$$S = \frac{l}{2a(K+1)} K a^2 = \frac{K}{2(K+1)} al.$$

L'égalité de ces deux valeurs de S permet d'écrire :

$$al = \sqrt{\frac{3(K+1)}{\pi^3 \rho\delta(3K+1)}}\sqrt{\frac{R_G}{R_c}\frac{T_0^3}{\sigma_V^2}}. \qquad (22)$$

D'autre part, la valeur imposée à la résistance R_G du cadre donne la relation :

$$l/d^2 = (\pi/4\rho)R_G. \qquad (23)$$

Pour un cadre en cuivre et pour $K = 4$ on obtient les valeurs numériques :

$$\begin{cases} al = 1{,}6.10^{-3}\sqrt{\dfrac{R_c}{R_G} \times \dfrac{T_0^3}{\sigma_v^2}} & (24) \\ l/d^2 = 4{,}9.10^{-4} R_G & (25) \end{cases}$$

Les égalités (24) et (25) permettent de calculer deux facteurs lorsque l'on se fixe le troisième.

Remarque : Dans le but, par exemple, d'avoir un meilleur miroir, on peut n'attribuer au moment d'inertie I_c du cadre qu'une fraction $\frac{1}{n}$ du moment d'inertie I de l'équipage (1) ; dans ces conditions les formules (19) et (24) deviennent :

$$\begin{cases} H^2 = 2{,}45.10^5 \dfrac{R_c}{R_G} \dfrac{n}{T_0} & (26) \\ al = 1{,}6.10^{-3}\sqrt{\dfrac{R_G}{nR_c} \dfrac{T_0^3}{\sigma_v^2}} & (27) \end{cases}$$

alors que les formules (15) et (25) restent inchangées.

Le cristal. — Le couple magnéto-cristallin doit avoir une valeur maxima qui permette d'annuler le couple directeur. Si C est la constante de torsion du ruban, on doit avoir la relation :

$$C = m(\chi_1 - \chi_2)H_{M\lambda}^2. \qquad (28)$$

Soit numériquement :

$$C = m \times 47{,}9.10^{-6} H_{M\lambda}^2. \qquad (29)$$

La valeur $H_{M\lambda}$ doit être suffisamment élevée par rapport à l'intensité du champ magnétique parasite créé au niveau du cristal par l'aimant principal (2). Le cristal doit posséder un moment d'inertie négligeable par rapport à celui de l'équipage, mais il doit avoir des dimensions suffisantes pour permettre sa mise en place et son orientation. Ces conditions permettent de déterminer les valeurs optima de la masse m du cristal et de l'intensité H_M du champ magnétique.

(1) M. Michel (38) a établi une formule simple de la sensibilité aux volts qui tient compte à la fois de la résistance propre du cadre et du moment d'inertie du miroir.

(2) Une plaque de fer doux placée entre les deux aimants réduit ce champ de fuite. Son intensité est cependant voisine de 2 pour cent de celle du champ magnétique au niveau du cadre.

Deux galvanomètres à cristal ont été calculés suivant cette méthode. Ils présentent, pour une valeur nulle du couple magnéto-cristallin, les caractéristiques suivantes :

		Galvanomètre I	Galvanomètre II
Période	T_0	1,7 sec.	5 sec.
Résistance du cadre .	R_G	7,5 ohms	7,5 ohms
Résistance critique .	R_c	50 ohms	100 ohms
Sensibilité aux volts .	σ_V	$1{,}66.10^{-5}$ radian/u. e. m. ($= 30.10^{-8}$ V/mm./1 m.)	5.10^{-5} radian/u. e. m. ($= 10.10^{-8}$ V/mm./1 m.)

Ces appareils ont été réalisés avec du fil de cuivre de diamètre $d = 0{,}005$ cm. En adoptant la valeur 2 pour le rapport $n = I/I_c$, le calcul conduit aux valeurs suivantes :

		Galvanomètre I	Galvanomètre II
Constante de torsion .	C	36.10^{-3} dyne-cm./radian	$6{,}5.10^{-3}$ dyne-cm./radian
Champ magnétique .	H	975 œrsteds	850 œrsteds
Largeur du cadre . .	a	0 6 cm.	0,7 cm.
Longueur du fil . .	l	92,5 cm.	92,5 cm.
Masse du cristal . .	m	29 mg.	5,2 mg.

Description de l'appareil. — Le TUBE qui entoure l'équipage a été conçu pour assurer une construction aisée et un centrage excellent du système mobile. Il se compose de trois parties (cf. fig. 3). La partie médiane 23 porte les pièces polaires 17 et 22 ainsi que le noyau de fer doux chromé 18. Elle est limitée en avant par une plaque rectangulaire de verre. Les parties supérieure et inférieure 13 et 25, vissées dans l'axe de la précédente, sont largement ouvertes sur la majeure partie de leurs faces postérieure et antérieure ; on peut ainsi souder aisément les rubans et les examiner par la suite sur toute leur longueur, même sur un galvanomètre en fonctionnement : il suffit de retirer les deux manchons métalliques protecteurs 14 et 26.

Au sommet du tube, le ruban de suspension est soudé à l'extrémité de la tige filetée 11. La vis 6 permet d'imprimer à l'équipage les rotations nécessaires pour amener le spot au point désiré de l'échelle. Une deuxième vis moletée 5 détermine des mouvements de translation de la tige centrale ; elle permet de régler la position du cadre par rapport à l'entrefer et de détendre le ruban supérieur pour le montage ou le transport.

A la partie inférieure du tube, la tige conductrice centrale 27 est isolée par la pièce d'ivoire 28.

De part et d'autre de l'entrefer deux diaphragmes circulaires 16

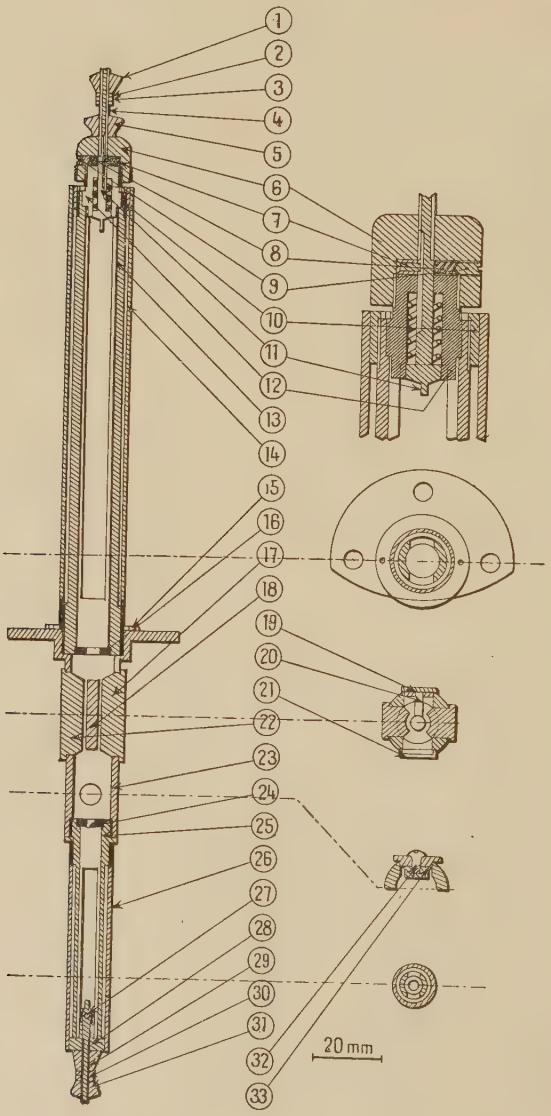


Fig. 3.

et 24 limitent, en cas de transport ou d'accident, les mouvements latéraux de l'équipage.

Une pièce circulaire 33, fixée à la partie postérieure de la portion médiane, fait saillie à l'intérieur du tube au niveau du miroir : elle empêche les rotations excessives du cadre et sert de support au miroir quand le tube est horizontal, ce qui complète l'action des diaphragmes.

Les aimants. — L'aimant principal est un aimant en C au cobalt (40 pour cent). Les pièces polaires sont limitées par une surface cylindrique de 22 mm. de longueur. Une vis moletée permet de déplacer un shunt magnétique. Avec un noyau de fer doux de 3 mm. de diamètre, le champ peut varier de 600 à 2 000 œrsteds.

Le champ magnétique agissant sur le cristal est créé par un petit aimant en U, auquel on peut imprimer des déplacements angulaires et longitudinaux. Les déplacements angulaires permettent de régler l'orientation relative du cristal et du champ. Les déplacements longitudinaux de l'aimant, associés à ceux d'un shunt magnétique, modifient l'intensité du champ. Sa valeur minima est inférieure à 10 œrsteds et sa valeur maxima voisine de 300 œrsteds.

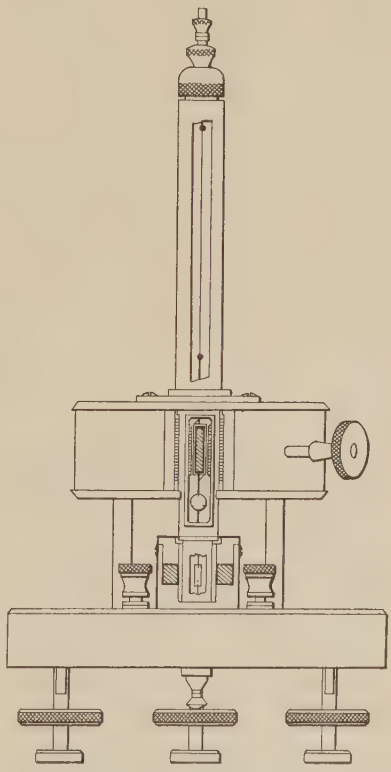


Fig. 4.

L'équipage mobile. — On peut se rendre compte sur la figure 4 de la position du miroir et de celle du cristal.

Le ruban de suspension est en bronze phosphoreux tandis que le ruban inférieur, en or et non tendu, introduit un couple inférieur à 2 pour cent de celui du ruban supérieur. Un dispositif constitué essentiellement par deux lames de rasoir accolées nous a permis de découper dans des feuilles d'or des rubans de 0,1 mm. de largeur. La feuille d'or, placée entre deux peaux ou deux papiers uti-

lisés par les batteurs d'or, est appliquée sur une surface plane ou mieux une surface cylindrique montée sur l'axe d'un tour. Pour des feuilles d'épaisseur $e \geqslant 0{,}4\ \mu$ l'opération est aisée. Pour des épaisseurs inférieures les difficultés apparaissent. Le tranchant des lames de rasoir n'est pas parfaitement rectiligne ; il présente, comme l'a montré M. G. Dupouy à l'aide du microscope électronique, des ondulations de l'ordre de $0{,}2\ \mu$ qui peuvent produire des discontinuités dans la coupe. Mais la difficulté la plus importante provient de l'adhérence du ruban d'or aux rubans de peau ou de papier entre lesquels il est placé. Il en est aisément séparé par immersion dans l'eau ; mais il est impossible de le retirer du liquide à cause de la tension superficielle élevée. On peut abaisser cette tension en remplaçant l'eau pure par des solutions d'alcool, d'éther, d'oléate de soude, etc. Nous avons obtenu de bons résultats en superposant de l'éther ou de l'acétate d'amyle à de l'eau pure : le ruban d'or se dépose à la surface de séparation des deux liquides, les rubans de papier se détachent facilement ; on laisse alors s'écouler le liquide ; quand la couche aqueuse s'épuise, le ruban d'or se dépose sur une surface métallique polie, dégraissée et légèrement décapée, disposée au fond du récipient. Il passe alors sans dommage dans le liquide supérieur puis dans l'air en raison des faibles tensions interfaciale (10,9 dynes/cm. entre l'eau et l'éther) et superficielle (18,0 dynes/cm. pour l'éther). Après évaporation complète du liquide, on enlève aisément le ruban de la surface métallique.

Nous avons pu obtenir par ce procédé des rubans de section $0{,}08\ \mu \times 100\ \mu$. Il serait inutile d'avoir des sections plus faibles : les rubans précédents possèdent déjà une résistance élevée (100 à 150 ohms/cm.). Pour notre premier type d'appareil, nous avons utilisé des rubans de section $0{,}4\ \mu \times 100\ \mu$ et pour le second $0{,}08\ \mu \times 1\,000\ \mu$.

Le cadre de $0{,}5 \times 2$ cm., axé sur une tige de cuivre de 0,4 mm. de diamètre, est constitué par vingt spires de fil de cuivre de 0,05 mm. de diamètre. Les précautions usuelles pour réduire le magnétisme du cadre (nettoyage du fil avec divers solvants, nettoyage identique de toute pièce en contact avec lui, usage de gomme laque et de soudure rigoureusement diamagnétique, le cas échéant recuit du fil [1]), etc.) ont été prises scrupuleusement.

(1) Dix cadres bobinés avec du fil de cuivre recuit pendant une heure en atmosphère d'hydrogène (soit au four à 600°, soit par passage d'un courant de 1,6 ampère) présentaient dans un champ magnétique uniforme un couple « parasite » moyen voisin de 5.10^{-4} C. G. S., tandis que pour dix cadres identiques construits avec le même fil non traité, ce couple était de $1{,}2.10^{-3}$ C. G. S.

M. le Professeur J. J. Trillat et M. F. Fournier, grâce à d'ingénieuses

En outre, parallèlement à l'usage d'un champ magnétique aussi radial que possible, nous avons procédé à la désaimantation de l'équipage par un champ magnétique alternatif d'intensité décroissante. La période de l'instrument après ce traitement est toujours sensiblement augmentée.

Nous avons pu réduire les défauts magnétiques de cadres particulièrement souillés par l'application de petits fragments convenablement orientés de fil « silmanal » aimanté transversalement ; pour cette matière magnétique qui contient 86 pour cent d'argent, le champ coercitif est de l'ordre de 6 000 œrsteds. Mais ce procédé n'est pas utilisable sur les cadres très peu souillés dont nous nous sommes servis.

Le miroir, situé au-dessous du cadre, a 6 mm. de diamètre et 0,3 mm. d'épaisseur. C'est une lame de verre plane sur laquelle nous avons déposé une mince couche de platine par pulvérisation cathodique à l'aide de l'appareil réalisé au laboratoire par M. R. Saporte (45).

Quant au cristal, il est fixé sur l'axe de l'équipage avec un peu de bakélite diamagnétique. Un essai préliminaire dans un champ magnétique quelconque permet l'orientation du cristal à quelques degrés près. L'orientation précise nécessaire est réalisée ultérieurement par rotation du petit aimant.

Fonctionnement. Réglage. — En agissant sur deux vis moletées on donne au petit aimant sa position postérieure limite et au shunt sa position antérieure limite : le couple magnéto-cristallin a une valeur nulle. On règle les vis calantes du socle de manière à ce que l'équipage oscille librement et on met le spot exactement au zéro. L'appareil possède sa sensibilité minima.

Si on déplace alors le petit aimant vers l'avant, le couple magnéto-cristallin apparaît. Le spot change de position par suite de l'orientation imparfaite du cristal et on le ramène au zéro par une légère rotation de l'aimant. Avec une échelle graduée à 1 m., une lecture du zéro à 1 mm. près assure une orientation correcte à 5.10^{-4} radian près. Lorsque le tube du galvanomètre est en entier entre les branches de l'aimant on peut encore accroître le champ magnétique en déplaçant le shunt vers l'arrière.

techniques de micrographie (20), ont pu réaliser les diagrammes de rayons X de ces fils et ils ont mis en évidence la taille beaucoup plus grande des cristaux après recuit. Ces résultats sont un argument en faveur du rôle joué par les couples magnéto-cristallins.

Nous désirons remercier MM. J. J. Trillat et M. F. Fournier pour leur précieuse collaboration.

Le couple magnéto-cristallin est proportionnel au carré de l'intensité du champ magnétique et de faibles variations du champ suffisent à obtenir des gains importants de sensibilité au voisinage de la valeur limite H_{M_λ} pour laquelle la sensibilité devient théoriquement infinie. Si on désire multiplier la sensibilité au courant par un coefficient supérieur à 4 ou 5, il est nécessaire d'augmenter le champ magnétique avec précaution.

Résultats. — Les tableaux I et II représentent les résultats obtenus respectivement avec les deux types d'appareils à cristal que nous avons réalisés. Le premier est équipé avec un ruban de bronze phosphoreux de constante de torsion 0,25 dyne-cm./radian par centimètre, un cristal de 30 mg. et un ruban d'or de section 0,4 $\mu \times 100\ \mu$. Sa résistance interne est de 35 ohms. Le second comporte un ruban de bronze phosphoreux de 0,025 dyne-cm./radian, un cristal de 5 mg. et un ruban d'or de section 0,08 $\mu \times 1\,000\ \mu$. Sa résistance interne est de 100 ohms.

Tableau I

Résistance critique (ohms)	Action du cristal	Période (sec)	Sensibilité	
			10^{-10} A par mm. à 1 m.	10^{-8} V par mm. à 1 m.
50	nulle	1,7	60	30
	maxima	6,0	10	5
100	nulle	1,75	40	40
	maxima	5,5	8	8
250	nulle	1,8	25	60
	maxima	5,0	7	18

Tableau II

Résistance critique (ohms)	Action du cristal	Période (sec)	Sensibilité	
			10^{-10} A par mm. à 1 m.	10^{-8} V par mm. à 1 m.
100	nulle	5,0	11,2	11
	maxima	12,0	3,0	3
200	nulle	4,6	9,4	19
	maxima	8,0	3,7	7
300	nulle	4,0	8,2	30
	maxima	6,5	4,0	14

Ces résultats montrent que la sensibilité peut être maintenue constante quand la résistance critique passe de 50 à 250 ohms pour le premier galvanomètre, de 100 à 300 pour le second.

Pour une résistance critique égale respectivement à 50 et 100 ohms, la sensibilité du premier peut être multipliée par 6, celle du second par 3,7.

La période du premier appareil varie de 1,7 à 6,0 secondes, celle du second de 4,0 à 12,0 secondes.

Le galvanomètre à cristal peut ainsi s'adapter au circuit de mesure tandis que, pour un appareil de type classique, c'est le circuit qu'il faut adapter au galvanomètre dont on dispose.

Les sensibilités maxima atteintes, 5.10^{-8} V/mm. à 1 m. et 3.10^{-8} V/mm. à 1 m., égalent celles des meilleurs galvanomètres actuels ; mais elles sont obtenues avec des galvanomètres aussi robustes que des appareils dix fois moins sensibles.

Cette haute sensibilité est essentiellement due à la possibilité d'obtenir des valeurs très faibles du couple directeur de l'équipage mobile sans augmenter la résistance interne de l'appareil. L'action du cristal sur le premier galvanomètre a permis de diviser le couple de rappel par $(6,0/1,7)^2 = 12,5$ et, sur le second, par $(12,0/5,0)^2 = 5,8$; comme les constantes de torsion des rubans sont respectivement

(p. 23) 36,0 et $6{,}5.10^{-3}$ dyne-cm./radian, les couples directeurs minima correspondant sont 2,9 et $1{,}1.10^{-3}$ dyne-cm./radian.

Malheureusement si l'on associe à des couples directeurs aussi faibles des champs magnétiques intenses, la résistance critique est trop élevée.

C'est pour remédier à cette incompatibilité et réaliser des appareils encore plus sensibles que nous avons été conduit à développer une méthode qui permet de réduire à volonté l'amortissement électromagnétique des galvanomètres. Elle fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III

GALVANOMÈTRE A CADRE COUPLÉ

A. — Étude théorique.

Sensibilité et mouvement. — Dans un galvanomètre, les facteurs qui déterminent la sensibilité déterminent aussi les conditions d'oscillation de l'équipage mobile. La sensibilité d'un appareil est étroitement liée à la fréquence et au régime d'amortissement de ces oscillations.

Ainsi un couple directeur faible et un flux magnétique important, caractéristiques d'un galvanomètre sensible au courant, déterminent une période et une résistance critique élevées. Un tel appareil est impropre à l'enregistrement de phénomènes rapides et sa sensibilité à la tension est médiocre.

Le « cadre couplé » est un dispositif simple, adaptable à tout galvanomètre, qui supprime cette dépendance de la sensibilité à l'égard des caractéristiques de l'oscillation. Il permet de réduire la résistance critique et, le cas échéant, la période à la valeur désirée sans modifier ni le couple directeur, ni le flux magnétique ; c'est-à-dire en conservant la sensibilité maxima de l'appareil.

Principe. — L'égalité des couples moteurs et résistants conduit à l'équation usuelle du mouvement de l'équipage :

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{\Phi_0^2}{R}\frac{d\theta}{dt} + C\theta = \Phi_0 i_0. \qquad (1)$$

On peut l'écrire sous la forme :

$$\frac{RI}{\Phi_0}\frac{d^2\theta}{dt^2} + \Phi_0\frac{d\theta}{dt} + \frac{CR}{\Phi_0}\theta = Ri_0. \qquad (2)$$

Les trois termes du premier membre sont homogènes à une différence de potentiel.

Supposons que des constantes réglables, positives ou négatives, α, β et γ puissent être ajoutées respectivement aux coefficients constants des termes en $d^2\theta/dt^2$, $d\theta/dt$ et θ ; ceci revient à appliquer aux bornes de l'appareil des forces électromotrices respectivement proportionnelles à $d^2\theta/dt^2$, $d\theta/dt$ et θ. L'équation (2) devient dans ces conditions :

$$\left(\frac{RI}{\Phi_0}+\alpha\right)\frac{d^2\theta}{dt^2}+(\Phi_0+\beta)\frac{d\theta}{dt}+\left(\frac{CR}{\Phi_0}+\gamma\right)\theta=Ri_0. \qquad (3)$$

α, β et γ permettent de régler indépendamment la période, la résistance critique et la sensibilité.

Une méthode consiste à placer près du galvanomètre une cellule photoélectrique *fixe*, éclairée par une source auxiliaire dont le faisceau lumineux frappe la cellule après réflexion sur le miroir du galvanomètre. Une partie de la force électro-motrice de cette cellule est appliquée directement au galvanomètre fournissant le facteur $\gamma\theta$; une autre partie, amplifiée et différenciée, fournit le facteur $\beta\frac{d\theta}{dt}$ et une fraction de cette dernière, à nouveau amplifiée et différenciée, conduit au facteur $\gamma\frac{d^2\theta}{dt^2}$ (46). Malheureusement, la linéarité de la liaison photoélectrique et des amplifications et surtout l'interposition de tout un dispositif électronique dans le circuit même du galvanomètre est un obstacle à cette méthode qui devient difficilement utilisable dans le domaine des très grandes sensibilités.

Le système du cadre couplé apporte une solution générale nouvelle :

L'image du spot lumineux se forme exactement au centre d'une cellule photo-électrique double, *mobile* sur deux rails parallèles à la réglette graduée. Tout déplacement du spot détermine une inégalité des deux courants photo-électriques. Ce déséquilibre déclenche le fonctionnement d'un petit moteur qui imprime à la cellule un déplacement identique à celui du spot. Les rotations de l'arbre de ce moteur sont proportionnelles à celles du cadre du galvanomètre.

Un tel dispositif est analogue à celui utilisé dans certains enregistreurs pour galvanomètres (43).

L'arbre du moteur détermine, par l'intermédiaire d'un système démultiplicateur, la rotation d'un cadre mobile dans l'entrefer d'un aimant permanent. La démultiplication est réglée de telle sorte que le cadre tourne du même angle que l'équipage du galvanomètre.

Ce *cadre couplé* porte deux enroulements B_1 et B_2. L'enroulement B_1, de résistance très faible par rapport à la résistance interne

du galvanomètre, est en série avec cette dernière. La force électromotrice née de sa rotation est de la forme $\beta \frac{d\theta}{dt}$. Le shunt magnétique dont est muni l'aimant permet de faire varier le coefficient β ; le sens des connections détermine son signe. On peut ainsi régler l'amortissement de façon indépendante de la sensibilité.

L'enroulement B_2 fournit une force électromotrice :

$$V = \Phi_{02} \frac{d\theta}{dt} .$$

Cet enroulement, de résistance R_2, est en série avec un condensateur de capacité C, et l'ensemble est placé en dérivation aux bornes du galvanomètre. La résistance R_2 est telle que la constante de temps $R_2 \times C$ est très petite par rapport à la période T_0 du galvanomètre. La décharge du condensateur est suffisamment rapide pour que l'on admette que la différence de potentiel aux bornes du condensateur est égale à la force électromotrice V qui prend naissance dans l'enroulement B_2. La charge Q de ce condensateur a donc pour expression :

$$Q = \Phi_{02} C \frac{d\theta}{dt} . \qquad (4)$$

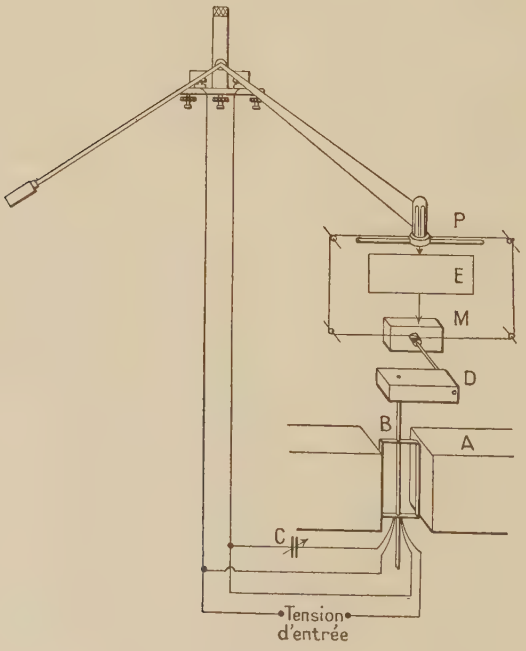


Fig. 5.

Et le courant dans le circuit du condensateur est :

$$I = \frac{dQ}{dt} = \Phi_{0_2} C \frac{d^2\theta}{dt^2}. \qquad (5)$$

La chute de tension qui en résulte aux bornes du galvanomètre est de la forme $\alpha \frac{d^2\theta}{dt^2}$. L'emploi d'un condensateur variable permet de modifier le coefficient α, c'est-à-dire la période de l'instrument.

Enfin, un simple potentiomètre entraîné par l'arbre du moteur peut fournir une force électromotrice proportionnelle à l'angle d'écart θ de l'équipage. Mais il y a avantage à utiliser dans ce but un couple magnéto cristallin.

La figure 5 est un schéma de l'ensemble du dispositif.

En résumé, par la seule introduction dans le circuit d'un cadre bobiné et d'un condensateur, on peut régler l'amortissement et la période d'un galvanomètre sans modifier sa sensibilité.

La cellule photo-électrique et les dispositifs électroniques sont complètement en dehors du circuit du galvanomètre et ne sont susceptibles en aucune façon d'en troubler le fonctionnement.

B. — Etude descriptive.

Le galvanomètre et le circuit de mesure. — Nous avons associé le cadre couplé à un galvanomètre à cristal : grâce à ce dernier on dispose du coefficient variable γ de l'équation (3) tandis que le cadre couplé fournit les coefficients α et β. La réduction de l'amortissement électromagnétique peut augmenter beaucoup la sensibilité du galvanomètre.

L'équipage du galvanomètre construit dans ce but diffère quelque peu de ceux décrits dans le chapitre II.

Le cadre a été bobiné à partir de fil « Wollaston » à noyau d'aluminium dont la périphérie de cuivre a été dissoute dans l'acide nitrique, sauf aux extrémités pour permettre d'effectuer de bonnes soudures.

Un tel cadre présente des défauts magnétiques très atténués : nous avons dressé sur la figure 6 les courbes $\sigma_i = f(H)$ obtenues avec trois équipages mobiles montés successivement dans le même tube. Ils ne diffèrent que par la nature du fil utilisé pour construire le cadre. On peut voir que le cadre d'aluminium se rapproche davantage du cadre théorique amagnétique que le cadre de cuivre, pourtant sélectionné parmi une dizaine de cadres semblables, construits avec les plus grandes précautions à l'égard des souillures. On peut noter également l'effet favorable de la désaimantation du fil.

La légèreté de ce cadre en aluminium conduit à une période relati-

vement peu élevée (3 sec.) et autorise l'emploi de rubans de suspension à charge de rupture faible. Le ruban supérieur est en or pur ; il présente une constante de torsion de 6.10^{-3} C. G. S. pour une résistance de 9 ohms. Le ruban inférieur, également en or pur, est enroulé en hélice ; le couple qu'il introduit est de l'ordre de 2.10^{-4} C. G. S. La résistance totale du galvanomètre est de 26 ohms.

Le cristal de sidérose est simplement fixé à l'axe de l'équipage par une goutte de bakélite dont on a vérifié le diamagnétisme. Un passage de quelques heures à l'étuve suffit à rendre parfaitement solide ce mode de fixation.

Le « cadre couplé » se meut entre deux pivots dans l'entrefer d'un petit aimant en Alnico 5, où règne un champ magnétique pouvant

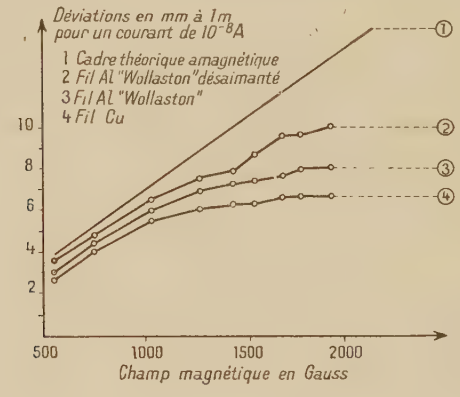


Fig. 6.

varier de 500 à 1 000 gauss par l'action d'un shunt magnétique. Ce cadre comprend, on l'a vu, deux bobinages : l'un, B_1 est formé de 35 spires 10 × 15 mm. de fil de cuivre de 0,1 mm. de diamètre ; la force électro-motrice qui y prend naissance sert à régler l'amortissement électromagnétique ; sa résistance électrique est de 6 ohms. Il est en série avec le galvanomètre et est de ce fait traversé par le courant à mesurer ; mais les forces électromagnétiques mises en jeu par ce dernier sont beaucoup trop faibles pour le mouvoir. Le sens des rotations, synchrones de celles du cadre du galvanomètre, qui lui sont imposées par l'intermédiaire des dispositifs électroniques et mécaniques, est indépendant de celui des rotations qu'il subirait si le courant à mesurer, qui le traverse, était suffisamment intense pour manifester son action.

L'autre bobinage B_2 est formé de 1 100 spires 12 × 17 mm. de fil de cuivre de 0,05 mm. de diamètre et a une résistance R_2 de 500 ohms.

Cet enroulement B_2 a pour but de réduire la période si cela s'avère utile. Il est en série avec un condensateur de capacité C variable de 10 à 50 microfarads. La constante de temps $R_2 \times C$ varie ainsi de 0,005 seconde à 0,025 seconde et reste très inférieure au centième de la période T_0.

Le circuit électronique. — La tension d'anode de la cellule photoélectrique double P (fig. 7) ainsi que la tension de grille des thyratrons L_1 et L_2 sont fournies par la lampe redresseuse

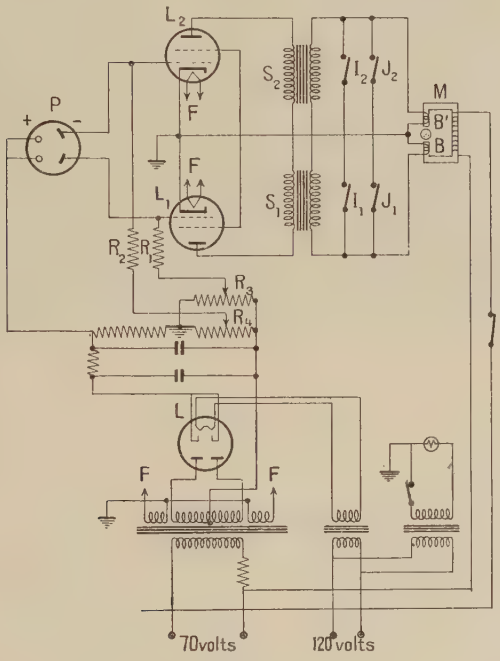


Fig. 7.

miniature L(R. C. A. 6H6). Les courants débités par chacun des deux éléments de P traversent respectivement les résistances R_1 et R_2 et déterminent l'amorçage des thyratrons si leur intensité est suffisante. Grâce au très faible courant de grille ($< 0,1$ micro-ampère) des tétrodes à gaz utilisées comme thyratrons, on a pu donner à R_1 et R_2 des valeurs élevées (10^7 ohms) de sorte qu'aucune amplification n'est nécessaire entre la cellule photoélectrique et les thyratrons. Lorsque l'un de ces derniers débite, son courant suffit à saturer l'inductance à saturation correspondante S_1 ou S_2, c'est-à-dire pratiquement à court-

circuiter les bornes de B et B', enroulements auxiliaires de démarrage de petit moteur asynchrone monophasé M.

Lorsque le spot lumineux est au repos, aucun thyratron n'est

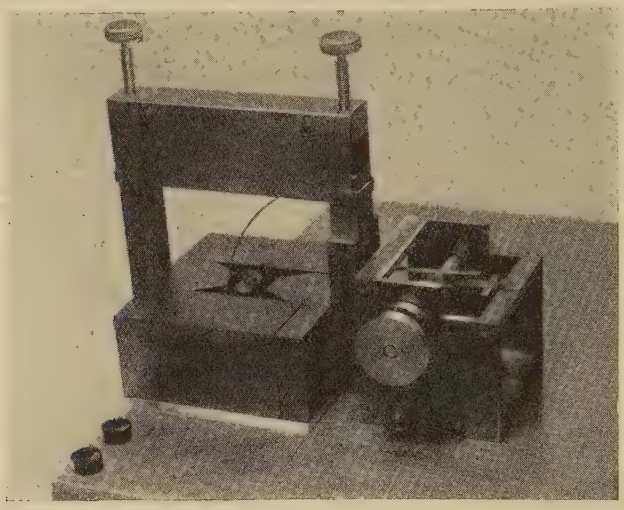


Fig. 8.

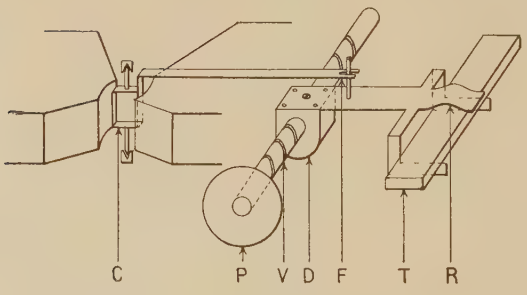


Fig. 9.

amorcé; mais son déplacement de 0,1 mm. environ entraîne l'amorçage du thyratron correspondant; le courant qui en résulte déclenche, par l'intermédiaire de l'inductance à saturation S_1 ou S_2, la marche du moteur dans un sens tel que la cellule accompagne le spot dans son déplacement. Ainsi se trouve réalisé un dispositif de relais extrêmement rapide dont la vitesse est fonction de la constante de

temps du circuit. Les résistances variables R_3 et R_4 permettent de régler les conditions d'amorçage des thyratrons.

Grâce aux interrupteurs manuels I_1 et I_2 on peut amener la cellule

Fig. 10.

en face du spot lors de la mise en marche. J_1 et J_2 sont deux interrupteurs automatiques qui arrêtent le moteur si le spot subit un déplacement supérieur à la course maxima de la cellule photoélectrique.

Les dispositifs mécaniques. — Le moteur, par l'intermédiaire d'un fil qui passe sur diverses poulies déplace la cellule photoélectrique le long de deux tiges chromées parallèles. L'axe d'une des poulies est solidaire d'une vis filetée V (fig. 8 et 9) ; la rotation de cette vis entraîne un déplacement linéaire du chariot D, qui détermine à son tour une rotation du cadre couplé C par l'intermédiaire de la fourchette de liaison F. Le chariot est astreint à se déplacer linéairement grâce au ressort R qui s'applique sur la réglette fixe T. La figure 8 est une photographie de cet arrangement tandis que la figure 9 en est la représentation schématique.

Les forces de friction ont pu être réduites dans une proportion telle que la cellule peut accompagner le spot à des vitesses de l'ordre de 10 cm./seconde.

Tous ces dispositifs électriques et mécaniques sont contenus dans une boîte métallique représentée sur la photographie 10 ; sa face antérieure présente une fente de 40×4 cm. derrière laquelle se déplace la cellule photoélectrique.

Sur sa face supérieure une réglette graduée en verre, fixée dans le même plan frontal que la surface sensible de la cellule, permet la mise au point préalable du spot. Le panneau arrière qui porte les divers boutons de commande, peut s'ouvrir pour faciliter un examen éventuel et, en particulier, pour régler l'amorçage des thyratrons.

C. — Résultats obtenus.

Le galvanomètre a cristal, sans le cadre couplé. — Le tableau I est relatif au fonctionnement sans action du cristal ; le tableau II correspond à une action du cristal, voisine du maximum, et compatible avec une bonne fidélité du zéro.

Tableau I

Résistance critique (ohms)	Période (secondes)	Sensibilité	
		10^{-10} A par mm. à 1 m.	10^{-8} V par mm. à 1 m.
45	2,9	29	14
200	2,8	16	32
375	2,65	12	45

Tableau II

Résistance critique	Période	Sensibilité	
		10^{-10} A par mm. à 1 m.	10^{-8} V par mm. à 1 m.
275	8,0	3	8
475	5,5	4	18
750	4,7	4	30

Action du cadre couplé sur le galvanomètre a cristal. — La résistance critique peut être réduite à 10 pour cent de sa valeur primitive. La sensibilité à la tension est alors sensiblement *décuplée*. C'est ainsi qu'à partir du galvanomètre précédent, nous avons obtenu les résultats consignés dans le tableau III.

Tableau III

	Résistance critique	Sensibilité	
		10^{-10} A par mm. à 1 m.	10^{-8} V par mm. à 1 m.
Sans action du cristal .	30	16	4,8
Avec action du cristal .	30	3	0,9

La résistance critique initiale était, dans les deux cas, voisine de 250 ohms. Le cadre couplé permet en outre de réduire la période d'oscillation à la moitié de sa valeur primitive.

Action du cadre couplé sur un galvanomètre « Zernicke » (1). — Le galvanomètre « Zernicke » dont nous disposons présente, pour une certaine position du shunt magnétique, une résistance critique de 240 ohms et une sensibilité aux volts de $14{,}5 . 10^{-8}$ V/mm./1 m.

La mise en série du cadre couplé permet de réduire la résistance critique à 47 ohms (résistance du circuit de mesure) et d'atteindre ainsi une sensibilité à la tension de $2{,}9 . 10^{-8}$ V/mm./1 m.

Limite d'emploi du cadre couplé. — Si Φ_{01} est le flux magnétique à travers l'enroulement B_1 du cadre couplé, l'équation du mouvement de l'équipage soumis à son action est :

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{\Phi_0^2 - \Phi_{01}^2}{R}\frac{d\theta}{dt} + C\theta = \Phi_0 i_0.$$

Lorsque la résistance critique est réduite à 10 pour cent de sa valeur initiale, Φ_{01}^2 est égal à 90 pour cent de Φ_0^2. Il existe une limite à cette réduction ; en effet, les champs magnétiques dans l'entrefer du galvanomètre et dans celui où se déplace le cadre couplé n'ont pas exactement la même topographie ; en outre, la vitesse de déplacement de la cellule photo-électrique présente, au cours d'une déviation, des écarts de 3 à 4 pour cent par rapport à celle du spot lumineux. Il en résulte que, pour des valeurs de Φ_{01}^2 supérieures ou égales à $0{,}95\Phi_0^2$, le coefficient d'amortissement en $d\theta/dt$ peut s'annuler ou même devenir négatif, ce qui entretient ou amplifie momentanément les oscillations. On peut donc considérer que le cadre couplé ne permet pas de réduire la résistance critique au delà de 5 pour cent de sa valeur primitive.

(1) Ce galvanomètre de haute sensibilité à la tension est construit par la maison Kipp à Delft (Hollande).

Conclusion. — Grâce au cristal de sidérose ajouté à l'équipage, on peut diviser par dix environ le couple directeur d'un galvanomètre, c'est-à-dire décupler sa sensibilité au courant; mais la résistance critique correspondante est telle que la sensibilité à la tension est à peine triplée.

Le cadre couplé complète cette action. Il réduit la résistance critique et permet de multiplier par dix la sensibilité à la tension. La période peut être divisée par deux. L'intensité du champ magnétique et la sensibilité au courant conservent leur valeur initiale.

Ainsi ce dispositif supprime, dans certaines limites que nous avons précisées, la dépendance de la sensibilité des galvanomètres à l'égard du régime d'amortissement.

Il a aussi pour avantage de réduire l'importance relative du mouvement brownien : on sait que, pour un galvanomètre en régime d'amortissement critique, la plus petite différence de potentiel mesurable est :

$$\delta v_{\min} = 4{,}48 \cdot 10^{-10} \sqrt{\frac{R}{T_0}} .$$

Quand le galvanomètre précédent présente les caractéristiques indiquées à la première ligne du tableau II, on a $\delta v_{\min} = 0{,}26 \cdot 10^{-8}$ volt. Par action du cadre couplé, la résistance critique passe de 275 ohms à 30 ohms (tableau III, ligne 2) et la sensibilité aux volts est multipliée par 9,2. Comme les fluctuations browniennes du spot conservent la même amplitude, la plus petite tension mesurable est $\delta v_{\min} = 0{,}028 \cdot 10^{-8}$ volt; elle correspond à une déviation du spot d'environ 3 centièmes de millimètre sur une échelle à 1 m.

En résumé, un simple enroulement en série avec un galvanomètre suffit à multiplier sa sensibilité à la tension par un coefficient de l'ordre de dix, sans accroître l'amplitude des mouvements browniens du spot. Le dispositif qui détermine les rotations de l'enroulement est d'une réalisation aisée; il ne présente aucune connexion électrique avec le circuit de mesure et ne peut donc le perturber en aucune manière. Un enroulement auxiliaire permet de réduire la période des oscillations.

Grâce à l'emploi simultané d'un couple magnéto-cristallin et d'un cadre couplé nous avons pu obtenir avec un galvanomètre robuste une déviation du spot de 1 mm. à 1 m. pour une tension de $0{,}9 \cdot 10^{-8}$ volt; quand un fil de cuivre de 1 mm. de diamètre est parcouru par un courant de 1 ampère, c'est la chute de potentiel entre deux points distants de 0,4 micron. Le galvanomètre possède, dans les mêmes conditions, une sensibilité à la puissance de $2{,}7 \cdot 10^{-18}$ watts.

Il est permis de penser que ces deux méthodes nouvelles apportent d'importants éléments de progrès dans la réalisation des galvanomètres de haute sensibilité.

CHAPITRE IV

APPLICATIONS A L'ÉTUDE DE LA GALVANONARCOSE ET A LA MESURE DE LA PRESSION OSMOTIQUE

Nous résumons dans ce dernier chapitre des recherches effectuées au laboratoire de physique biologique de la Faculté de Médecine et qui ont nécessité l'emploi de galvanomètres très sensibles.

A. — La galvanonarcose.

On peut déterminer la narcose chez l'animal par un courant continu d'intensité suffisante, dirigé de l'extrémité céphalique à l'extrémité caudale ; cette « galvanonarcose » a été observée en 1875 par Mach sur le poisson mais le terme n'a été proposé qu'en 1893 par Blasius et Schweitzer. Plus tard, en 1922, F. et Fr. Sheminzky en ont entrepris l'étude à l'Institut de Vienne (69).

L'expérimentation est particulièrement commode sur le poisson : lorsque celui-ci évolue dans une eau traversée par un courant continu d'intensité croissante, il présente d'abord une agitation anormale, puis tend à s'orienter parallèlement aux lignes de courant avec la tête vers le pôle positif : c'est le stade de la galvanotaxie positive ; enfin, pour un courant plus intense, le poisson après quelques oscillations autour de son axe longitudinal, se couche sur le flanc et s'immobilise ; l'attouchement de son corps ne provoque alors aucune réaction. Le stade de la galvanonarcose est atteint. La coupure du courant rétablit *instantanément* la mobilité normale de l'animal.

Constance de seuil. — Si on renouvelle la narcose d'un même poisson, on constate que le phénomène se manifeste dans des conditions électriques linéaires fixes : la valeur de l'intensité du courant qui traverse la cuve ou de la tension à ses bornes au moment où la narcose apparaît ne présente pas de variation supérieure à 10 pour cent.

Nous avons, d'autre part, réalisé la galvanonarcose d'un même poisson dans des liquides de *conductibilité très différente*. Nous avons calculé (1) les valeurs liminaires de l'intensité du courant dans le corps de l'animal et de la tension entre ses extrémités céphalique et caudale. Les chiffres obtenus présentent des écarts de 30 à 35 pour cent par rapport aux valeurs moyennes. Pour préciser si ces écarts traduisaient une variation réelle du seuil ou devaient être imputés à l'insuffisance de la méthode, nous avons entrepris le tracé des lignes équipotentielles au voisinage du poisson immobilisé et soumis à la galvanonarcose.

(1) Le corps du poisson et le liquide environnant sont considérés en première approximation comme des conducteurs disposés en parallèle.

Le tracé des lignes équipotentielles. — Il était nécessaire d'utiliser le courant continu qui est un facteur essentiel de l'apparition du phénomène. Nous avons dû atténuer le plus possible les phénomènes de polarisation ; à cet effet, après avoir vérifié que le seuil électrique de la galvanonarcose était le même pour des solutions isotoniques de différents ions, nous avons utilisé soit des solutions étendues de sulfate de cuivre avec une sonde exploratrice de cuivre, soit des solutions de chlorure de sodium en prenant pour sonde un fil d'argent recouvert par électrolyse d'un film de chlorure d'argent. Nous avons, en outre, effectué les mesures pour des différences de potentiel aux bornes de la cuve voisines de 1 millivolt, très inférieures à celles qui déterminent la narcose. La sonde verticale était fixée à une règle graduée horizontale, susceptible de coulisser entre deux règles graduées fixes ; l'ensemble des trois graduations réalisant un vernier, il était possible de repérer la position de la sonde à 0,1 mm. près. Nous avons déterminé ainsi la répartition du potentiel le long d'un certain nombre de droites parallèles à la plus grande dimension de la cuve. Le courant continu était fourni par un accumulateur. Une résistance potentiométrique, à échelle graduée, était connectée en parallèle avec la cuve et un galvanomètre, interposé entre le curseur de cette résistance et la sonde, fonctionnait comme appareil de zéro. Deux lignes équipotentielles successives correspondaient à une différence de 10 microvolts, qui était mesurée à 2 pour cent près avec un galvanomètre, possédant une sensibilité de 12.10^{-8} volts/mm./m.

Les résultats. — La figure 11 représente l'un des tracés obtenus dans une cuve de 18,3 cm. × 9,7 cm. avec une carpe de 61,5 mm. de long et 12,5 mm. d'épaisseur, dans une solution de chlorure de Na à 220 mg. par litre. Nous avons représenté, en trait interrompu, les deux lignes de courant tangentes au corps du poisson. Les 310 points expérimentaux sont répartis en 7 lignes parallèles à la grande dimension de la cuve. La tension aux bornes de la cuve était de 620 microvolts ; 42 équipotentielles ont été tracées, définissant 41 intervalles de 10 microvolts chacun, échelonnés de 102 à 512 microvolts. Au delà des équipotentielles extrêmes, le champ est sensiblement uniforme.

La tension entre le museau et la base de la queue (extrémité de la partie charnue) était de 75 ± 5 microvolts et représente 12,1 pour cent de la tension aux bornes.

L'intensité du courant dans la cuve était de 0,65 microampère. On peut calculer à partir du tracé des lignes de courant, trajectoires orthogonales des lignes équipotentielles, qu'environ 25,5 pour cent du courant total traverse le corps du poisson.

Avec la même solution, la narcose de cette carpe se manifestait pour une tension aux bornes de la cuve de 5,7 volts et une intensité de

4,8 milliampères. On peut déduire de ces résultats (1) qu'au seuil de la narcose l'animal est traversé par un courant de $4{,}8\,\frac{25{,}5}{100} = 1{,}22$ milliampère; tandis que la différence de potentiel entre les extrémités du corps est de $5{,}7\,\frac{12{,}1}{100} = 690$ millivolts.

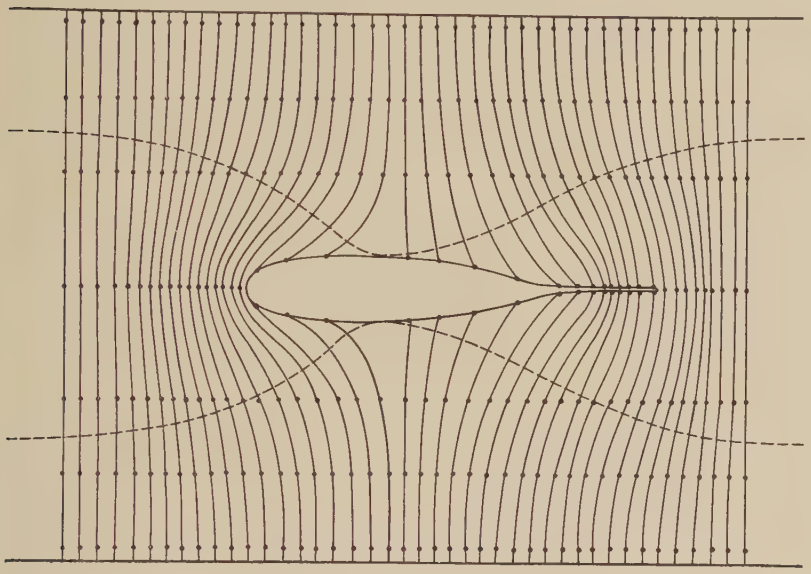


Fig. 11.

L'ensemble de ces mesures a été renouvelé dans le cas de concentrations salines diverses du milieu. Le tableau suivant résume les résultats :

Concentration en mg. ClNa par litre	v_0/V_0	i_0 I_0	V_0 (volts)	I_0 (mA.)	v_0 (volts)	i_0 (mA.)
220	0,12	0,25	5,7	4,8	0,690	1,22
130	0,07	0,34	7,2	3,70	0,535	1,32
93	0,05	0,37	9,2	3,55	0,545	1,32
65	0,04	0,42	9,8	2,75	0,400	1,14
32,5	0,02	0,45	13,1	2,45	0,280	1,10

(1) Nous avons vérifié que la résistivité moyenne de l'animal était sensiblement la même lors du tracé des équipotentielles et lors de l'étude du seuil.

V_0, I_0, v_0, i_0, représentent respectivement les conditions électriques liminaires pour l'ensemble de la cuve et pour le corps de l'animal.

La tension v_0 présente des écarts de 40 pour cent par rapport à sa valeur moyenne. Par contre, les diverses valeurs de i_0 ne diffèrent pas de plus de 10 pour cent de la valeur moyenne.

Dans une étude identique effectuée sur un poisson gardon de 51 mm. de long, ces mêmes divergences sont de 62 pour cent pour v_0 et de 11 pour cent pour i_0.

Ainsi l'apparition de la galvanonarcose semble être déterminée par la valeur de l'intensité du courant dans le corps du poisson, c'est-à-dire par la densité du courant au niveau des récepteurs nerveux élémentaires.

Etude théorique des équipotentielles. — En assimilant le problème à un problème de distribution plane du potentiel, nous avons pu obtenir, pour chaque poisson et chaque conductibilité du milieu, un tracé théorique des lignes équipotentielles.

Soit une zone conductrice circulaire au sein d'un milieu plan indéfini moins bon conducteur, parcouru par un courant électrique uni-

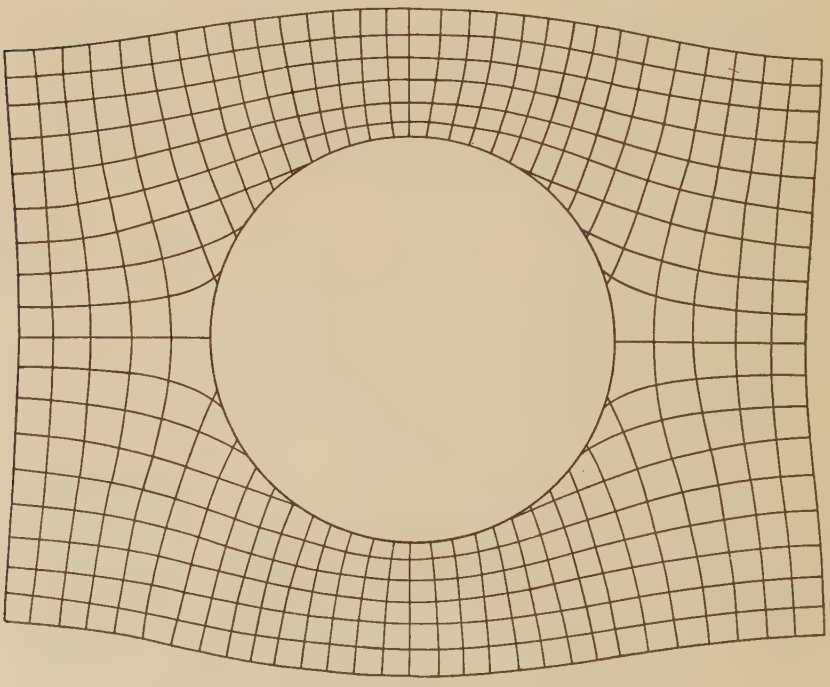


Fig. 12.

forme. Les lignes de courant et les lignes équipotentielles présentent au voisinage de la zone circulaire une topographie connue qui a été vérifiée expérimentalement grâce à la méthode hydrodynamique. En coordonnées polaires, les équations des lignes équipotentielles et des lignes de courant sont respectivement :

$$\begin{cases} V = a\left(r - \dfrac{r_0^2}{r}\right)\cos\theta = \text{constante} \\ \varphi = a\left(r + \dfrac{r_0^2}{r}\right)\sin\theta = \text{constante}, \end{cases}$$

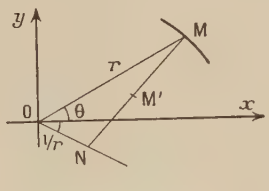
en choisissant pour centre de coordonnées le centre de la zone circulaire et pour direction ox celle du courant uniforme dans le plan. Si R est le rayon de la zone circulaire, la constante r_0 doit être choisie tel que :

$$r_0 = R\sqrt{\frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 + \mu_2}}$$

μ_1 et μ_2 désignant respectivement la conductibilité du milieu plan et celle de la zone circulaire.

La figure 12 représente le résultat obtenu dans le cas où $\mu_2/\mu_1 = 3$.

A partir d'un tel tracé, il est possible, en conservant la distribution uniforme dans le plan, et le rapport des conductibilités, de transformer la zone circulaire en zone pisciforme de dimensions géométriques données. Nous avons utilisé la transformation de Joukowsky qui, à tout point M(r, θ) du premier tracé, fait correspondre un point M′, milieu du segment MN, N étant défini par les coordonnées polaires $(1/r, -\theta)$.



Un cercle de diamètre AB sur l'axe OX a pour transformée, en prenant l'origine O tel que BO = 1 (fig. 13), une courbe pisciforme (Γ).

En posant OC $= a$, l'équation polaire du cercle C est :

$$\text{Cos}\,\theta = \frac{r^2 - (2a+1)}{2ar},$$

et l'équation paramétrique de (Γ) est :

$$\begin{cases} x = \dfrac{1}{4a}\left(1 + \dfrac{1}{r^2}\right)\left[r^2 - (2a+1)\right] \\ y = \dfrac{1}{4a}\left(1 - \dfrac{1}{r^2}\right)\sqrt{4a^2r^2 - \left[r^2 - (2a+1)\right]^2} \end{cases}$$

La longueur BS $= l$ se calcule sans difficulté :

$$l = \frac{2(a+1)^2}{2(a+1) - 1}.$$

La largeur maxima IJ $= e$ correspond à :

$$r = \frac{1}{2}\sqrt{(2a+1)[(2a+1)+\sqrt{(2a+1)^2+8}]}.$$

Les courbes représentant les variations de l et de l/e en fonction de a permettent de définir, sans ambiguïté a et l'unité BO pour que la transformée de Joukowsky du cercle (C) ait même largeur et même longueur que le poisson étudié.

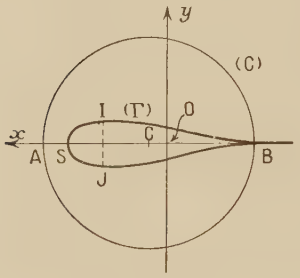


Fig. 13.

Pour une carpe de 61,5 mm. de long et de 12,5 mm. d'épaisseur, $a = 5{,}7$ mm. et BO $= 30{,}0$ mm. Dans le cas d'un bain de résistivité trois fois supérieure à celle de l'animal, le tracé est celui de la figure 14. Il est presque superposable au tracé expérimental obtenu pour le même animal, dans les mêmes conditions (fig. 11).

L'assimilation du corps du poisson à un conducteur homogène semble donc acceptable et il est permis de penser que le tracé théorique est encore valable à l'intérieur du corps. Au sein de la zone circulaire envisagée primitivement, les lignes de courant étaient des droites parallèles à l'axe OX ; les transformées sont des courbes qui présentent une ordonnée minima au point d'intersection avec l'axe OY (fig. 13). C'est à ce niveau que la densité du courant électrique serait la plus élevée et par suite son action la plus intense. Son abscisse varie très peu avec la forme du poisson : si l est la longueur de celui-ci, ce point se situe à une distance égale à $0{,}51\ l$ de l'extrémité céphalique.

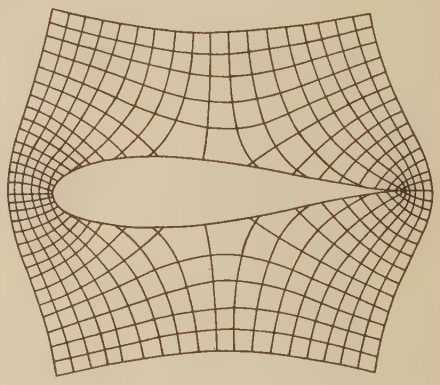


Fig. 14.

Pour vérifier si l'action narcotique du courant s'exerçait bien dans cette région moyenne du poisson et non dans la portion céphalique, nous avons réalisé l'expérience suivante (1) : un collier de cuivre serré

(1) La vérification expérimentale directe au moyen d'une aiguille exploratrice interne impolarisable, est pratiquement irréalisable.

autour du corps de l'animal, au niveau des ouïes, était relié par un fil isolé à la borne négative de la source de courant continu ; le poisson était immergé dans la cuve la tête dirigée vers l'électrode positive.

Pour des tensions suffisamment élevées nous avons observé des perturbations de la motricité, mais en aucune manière comparables à celles de la galvanonarcose.

Par contre, en reliant le collier à la borne positive et l'électrode située en arrière du poisson à la borne négative, nous avons vu apparaître, pour une tension convenable, des phénomènes identiques à ceux de la galvanonarcose.

Nous avons ainsi acquis la certitude que la narcose électrique implique essentiellement une perturbation des fonctions médullaires.

Ce résultat, établi sur des bases purement physiques, explique bien le fait que la galvanonarcose se manifeste par la suppression d'une série d'actes réflexes automatiques.

La galvanonarcose facilite l'action de certains anesthésiques, mais ceci n'implique pas l'identité des mécanismes des deux narcoses chimique et électrique ; en particulier la sensibilité ou l'activité psychique peuvent être affectées inégalement. Des tentatives (63) pour assimiler la paralysie due aux anesthésiques à un blocage catélectronique se sont heurtées à la divergence des propriétés anesthésiques de corps de type différent.

En réalité, l'action narcotique revêt des formes multiples qui ne sauraient êtres réduites à un schéma unique. Néanmoins la méthode courant-dose (Ström-dosis-verfahren) qui consiste à étudier l'action pharmacodynamique de substances douées de propriétés anesthésiques ou excitantes par superposition de leur effet à celui de la galvanonarcose (70) a le mérite de mettre en évidence les effets complémentaires d'un agent chimique et d'un agent physique.

En résumé, après avoir vérifié l'existence d'un seuil électrique nous avons réalisé le tracé de lignes équipotentielles autour du poisson placé dans un milieu aqueux traversé par un courant continu. Cette étude nous a permis de préciser l'importance de l'intensité du courant dans le corps de l'animal ; enfin, par un tracé théorique, nous avons localisé la zone d'intensité maxima. Ces résultats d'une étude physique du phénomène concordent bien avec ceux de l'étude physiologique antérieurement acquis (64).

B. — Contribution à la mesure de la pression osmotique.

Diverses méthodes permettent de déterminer la pression osmotique des liquides organiques (62) : La mesure directe est difficile à effectuer, mais il existe deux méthodes indirectes générales qui consistent à mesurer soit l'abaissement du point de congélation, soit

l'abaissement relatif de la tension vapeur, tous les deux proportionnels, comme la pression osmotique, à la concentration des molécules et des ions.

Le dispositif cryoscopique classique (tube de Beckmann) ne permet pas de mesures très précises. De son côté la méthode tonométrique la plus récente, la microméthode thermoélectrique de Hill-Baldes, est élégante et précise mais devient inutilisable pour des corps dissous volatils.

Nous avons pu mettre au point un procédé de cryoscopie qui permet des déterminations plus précises sur des volumes plus faibles de liquide.

Nous avons également essayé d'adapter la méthode thermoélectrique au cas des corps volatils.

Dans les deux cas, on est ramené à la mesure de forces électromotrices thermoélectriques et des galvanomètres de haute sensibilité à la tension sont indispensables.

1° **L'électrocryoscope.** — En cryométrie classique, le refroidissement du liquide étudié est réalisé au moyen d'un mélange réfrigérant dont la température est notablement inférieure au point de congélation cherché. Lorsque la surfusion cesse, la formation exothermique de glace tend à élever la température de la solution jusqu'à son point de congélation mais l'action du réfrigérant n'en continue pas moins à se manifester si bien que l'équilibre thermique que l'on observe pendant quelques instants a lieu pour une température inférieure à la température de congélation cherchée ; il faut procéder à une étude du système cryoscopique et corriger l'indication thermométrique. On doit, en général, se contenter d'une précision voisine de 0,01° C, équivalant à environ 0,15 g. de ClNa par litre.

Dans notre méthode, le refroidissement de la solution est obtenu au moyen de l'effet Peltier (1), c'est-à-dire de l'absorption de chaleur qui a lieu au niveau de l'une des soudures d'un thermocouple parcouru par un courant électrique de sens convenable. Dès que la congélation se produit, on arrête le courant de refroidissement et les échanges thermiques du système glace-solution avec le milieu extérieur peuvent être alors suffisamment réduits pour que l'équilibre thermique observé corresponde au point cryoscopique réel de la solution. Le thermo-

(1) On sait que cette propriété, découverte par Peltier (67), en 1834, a été vérifiée expérimentalement par Lenz et Tyndall (66, 73). Quelques études théoriques, en particulier celle de Altenkirch (60) furent effectuées un peu plus tard. C'est en 1902 que d'Arsonval (61) proposa l'emploi de l'« effet Peltier » pour atteindre des températures voisines du zéro absolu ; enfin, en 1929, Turrettini put abaisser de près de 200 C la température d'environ 700 cm^3 de liquide (72).

couple utilisé pour le refroidissement par l'effet Peltier peut également servir à mesurer la différence de température entre la soudure active, qui plonge dans le liquide à refroidir, et la soudure neutre qui est maintenue à une température constante ; à cet effet, un inverseur permet de connecter le thermocouple soit aux bornes d'un galvanomètre, soit aux bornes des accumulateurs qui fournissent le courant.

Un certain nombre de conditions doivent être remplies :

1° Après l'apparition des cristaux de glace et la coupure du courant de refroidissement, les échanges thermiques du mélange glace-solution avec le milieu extérieur doivent être très faibles. On est conduit à donner à ce milieu une température voisine du point de congélation cherché. Ce résultat est obtenu par immersion de l'ensemble du cryoscope dans un bain dont la température, convenablement choisie, est maintenue constante. Seul le petit volume occupé par la solution étudiée autour de la soudure active est isolé thermiquement du bain par une couche de liège.

2° Lorsque l'équilibre thermique, qui fait suite à l'apparition des cristaux de glace, est atteint, la différence de température entre la soudure neutre du thermocouple, qui est à la température du bain, et la soudure active qui est à la température de congélation cherchée, est très faible, de l'ordre de 0,1° C, puisque l'on a précisément choisi la température du bain à cet effet. Il importe donc, pour pouvoir mesurer avec précision le courant thermoélectrique correspondant, de disposer d'un galvanomètre très sensible.

3° Dans le volume utile que l'on cherche à refroidir, il y a superposition de l'effet Joule exothermique, à l'effet Peltier endothermique, si bien que la quantité de chaleur qui y apparaît lors du passage d'un courant d'intensité I est de la forme :

$$Q = aI^2 - bI$$

où les constantes a et b dépendent de la nature des conducteurs et de leur section. Q est négatif pour $0 < I < b/a$ et sa valeur absolue est maxima pour $I = b/2a$; c'est la valeur optima de l'intensité du courant de refroidissement.

Nous avons réparti symétriquement par rapport à la soudure active la quantité de chaleur aI^2 due à l'effet Joule en donnant aux conducteurs des sections proportionnelles à leur résistivité.

Le bismuth et l'antimoine sont des conducteurs de choix : leur effet thermoélectrique est très important (76 microvolts par degré), tandis que la faible valeur de leur conductibilité thermique (voisine de 2 pour cent de celle de l'argent) contribue à réduire le terme aI^2.

Description de l'appareil. — Nous avons adopté le montage représenté sur la figure 15. Un cylindre creux de bismuth contient dans sa lumière une tige d'antimoine dont la surface est isolée électriquement

par une pellicule de polystyrène. Leur longueur commune est de 45 mm. et le diamètre extérieur de l'ensemble est de 5 mm. Ils sont soudés à leur extrémité inférieure par l'intermédiaire d'une pastille de cuivre qui constitue la soudure active. Le cylindre de bismuth a une section droite 3, 4 fois supérieure à celle de la tige d'antimoine car ce dernier métal possède une résistivité 3, 4 fois plus faible ; un tube ajouré et une tige axiale en cuivre prolongent vers le haut les conducteurs précédents et c'est le point de jonction qui constitue la soudure neutre. Un manchon métallique enveloppe le tout ; il est interrompu vers sa partie supérieure pour éviter la conduction thermique ; ses deux portions sont maintenues en place à l'aide d'un cylindre de liège.

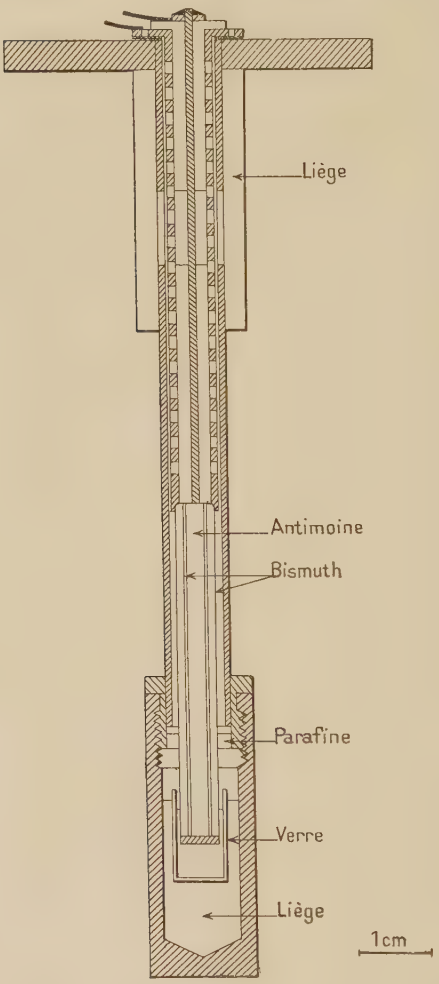


Fig. 15.

La portion inférieure de ce manchon métallique est remplie d'huile de paraffine pour favoriser l'équilibre thermique entre les divers conducteurs et le milieu extérieur.

Un joint sépare la région précédente de la soudure active. Cette dernière plonge dans quelques dixièmes de centimètre cube du liquide étudié, contenus dans un tube de verre. L'ensemble du dispositif est étanche.

Les mesures ont été effectuées avec un galvanomètre à cristal présentant une sensibilité de 7.10^{-8} volts/mm./1 m ; 1 mm. de l'échelle correspond sensiblement à 0°001.

Le courant de refroidissement est fourni par une batterie d'accumulateurs dont la borne positive est reliée au cylindre de bismuth. Sa valeur optima est voisine de 1 ampère. Dans ces conditions, on

obtient en 5 minutes un abaissement de température d'environ 1°5.

Pour l'étude des liquides organiques dont l'abaissement cryoscopique varie entre 0°30 et 0°80, il est commode d'immerger l'appareil dans une solution de ClNa à 9 g. par litre partiellement congelée, contenue dans un vase de Dewar. Sa température est voisine de —0°55. Après amorçage de la congélation, la température du système glace-solution s'élève rapidement et au bout de 1 ou 2 minutes, elle se stabilise à une valeur qui demeure constante pendant au moins 5 minutes ; la déviation du spot du galvanomètre ne varie pas durant cet intervalle de plus de 2 mm., ce qui correspond à 0°002, lorsque l'écart de température entre le bain où plonge le cryoscope et le point de congélation cherché n'excède pas 0°1 C. Sur dix déterminations effectuées avec des solutions salines de concentration ionique connue, l'écart maximum entre la température d'équilibre et celle du point de congélation théorique a été de 0°005.

En résumé, l'électrocryoscope permet de déterminer directement l'abaissement cryoscopique sur des échantillons de volume très faible et avec une précision au moins égale à 0°005.

Cependant il est nécessaire de connaître à l'avance la température approximative de congélation cherchée pour donner au mélange dans lequel plonge le dispositif une température voisine. D'autre part, pour des abaissements cryoscopiques de plusieurs degrés, le temps nécessaire au refroidissement électrique par l'effet Peltier devient considérable (il faut plusieurs heures pour atteindre l'abaissement de température limite, voisin de dix degrés). Mais ces deux inconvénients ne sont pas gênants pour des liquides organiques ; leurs points de congélation sont au surplus suffisamment voisins pour que l'on puisse utiliser un bain unique. C'est donc avant tout en physique biologique que l'électrocryoscope est susceptible de remplacer avantageusement le procédé classique.

2° Possibilités d'extention de la microméthode thermoélectrique de Hill-Baldes au cas de corps volatils dissous. — L'électrocryoscope permet la mesure de la pression osmotique sur des échantillons de volume très faible et dispense des corrections nécessaires avec le dispositif cryoscopique classique. Mais les méthodes cryoscopiques ne sont pas très sensibles : une variation de 0°01 du point de congélation d'une solution aqueuse correspond à un changement de concentration saline de 0,003 molécule de ClNa par litre, c'est-à-dire à une variation de pression osmotique voisine de 10 cm. de mercure.

La *microméthode thermoélectrique* de Hill-Baldes est applicable à des quantités de liquide encore plus réduites et possède une sensibilité nettement supérieure.

Si l'on place une goutte d'une solution aqueuse sur la soudure d'un

thermocouple, au centre d'un boîtier étanche immergé dans un thermostat et dont la paroi intérieure est tapissée d'un papier-filtre imbibé d'eau pure, le gradient de tension de vapeur entre le boîtier et la goutte détermine un transport de vapeur par diffusion ; la condensation qui en résulte élève la température de la goutte et donne naissance à un courant thermoélectrique que l'on mesure à l'aide d'un galvanomètre. Cette élévation de température est limitée non seulement par les déperditions de chaleur, mais aussi par l'accroissement de tension de vapeur qu'elle entraîne. Un régime stable s'établit à la faveur duquel il est possible de déduire la pression osmotique de la goutte de sa variation de température :

$$\Delta T = \frac{\Delta P_0}{A/B + \beta P_0} \qquad (1)$$

où : ΔT est l'élévation de température de la goutte,

ΔP_0 l'abaissement de tension de vapeur de la solution,

A le coefficient de déperdition de chaleur de la goutte ($Q' = A\Delta T$),

B le coefficient d'apport calorique par condensation :

$$(Q = B[\Delta P_0 - \beta P_0 \Delta T]),$$

P_0 la pression de vapeur de l'eau pure à la température du thermostat,

β le coefficient de variation de la tension de vapeur d'eau en fonction de la température $\left(\beta = \frac{1}{P_0}\frac{dP}{dt}\right)$.

La sensibilité du dispositif utilisé dépend de la valeur du rapport A/B, mais le terme βP_0 impose une limite. En pratique, avec les dispositifs analogues à celui décrit par M. R. Auvergnat (62) (1), A/B est égal à quelques dixièmes seulement de βP_0, si bien que la précision des mesures dépend surtout de la sensibilité du galvanomètre et de la qualité du thermostat.

On peut sans difficulté déceler une variation de concentration saline de 0,0007 molécule de chlorure de sodium par litre. Avec des précautions spéciales, certains expérimentateurs (68) ont pu détecter des variations de température de 5.10^{-5} degré, c'est-à-dire des variations de concentration saline voisines de un dix-millième de molécule de chlorure de sodium par litre.

On peut dire que la méthode thermoélectrique est au moins dix fois plus sensible que la méthode cryoscopique, bien que les abaissements

(1) Une thermopile manganine-constantan-manganine a ses deux soudures disposées près du centre du boîtier. Sur l'une d'elles on dépose une goutte de la solution étudiée et sur l'autre une goutte de la solution de référence, en général de l'eau pure. Le boîtier étanche est immergé dans un thermostat.

de température à mesurer soient sensiblement dix fois plus faibles. Mais si le corps dissous est volatil, il diffuse de la goutte vers le boîtier et la différence de température s'annule rapidement.

La modification suivante est susceptible d'étendre la méthode à un grand nombre de corps volatils :

Supposons que les deux gouttes G_1 et G_2, dont on veut mesurer la différence de tension de vapeur, soient placées dans deux chambres distinctes A et B reliées par une conduite capillaire C.

Supposons que G_1 soit une goutte d'une solution aqueuse d'un corps volatil et G_2 une goutte d'eau pure.

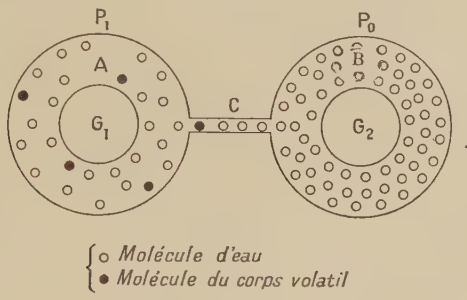


Fig. 16.

En l'absence d'air, la pression dans la chambre B est égale à la tension de vapeur P_0 de l'eau pure, tandis que dans la chambre A, la vapeur, constituée en partie par des molécules d'eau et en partie par des molécules du corps volatil dissous, se trouve sous une pression P_1 fonction de la nature et de la concentration du corps volatil dissous.

Pour un grand nombre de corps volatils, cette pression P_1 est inférieure à P_0 et il se produit un écoulement de vapeur de la chambre B vers la chambre A. Si on donne au diamètre d et à la longueur l de la conduite C des valeurs convenables, l'écoulement en régime visqueux de la vapeur d'eau pure de B vers A est assez rapide pour rendre négligeable le transport par diffusion des molécules du corps volatil de A vers B et assez lent pour ne pas modifier de façon appréciable le volume des gouttes.

Ce n'est pas, comme dans la méthode originale, la vitesse de diffusion de la vapeur qui limite le transport de molécules d'eau vers la goutte de solution, c'est la faible conductance de la conduite C.

Caractéristiques de la conduite. — Vitesse d'écoulement en régime visqueux.

L'écoulement de la vapeur d'eau à travers la conduite C s'effectue

en régime visqueux si le diamètre d est très supérieur au libre parcours moyen lm des molécules :

$$d \gg lm. \tag{2}$$

A 20° C, lm est voisin de 2 microns.

Si ΔP est la différence de pression entre les deux chambres A et B, la masse de vapeur d'eau qui s'écoule par seconde à travers la conduite C de diamètre d et de longueur l est à 20° C :

$$m = \rho V = \frac{P_0 M}{RT} V = 5{,}5 \cdot 10^{-3} \frac{d^4}{l} \Delta P \tag{6}$$

où m est exprimé en grammes par seconde si d et l sont en centimètres et ΔP en microns de mercure.

— Vitesse de diffusion du corps volatil de A vers B :

Choisissons pour axe OX l'axe de la conduite C, orienté de A vers B et pour origine l'orifice de C dans la chambre A. Soit N_0 le nombre de molécules du corps volatil par centimètre cube dans A et soit N ce même nombre dans la conduite C à une abscisse x.

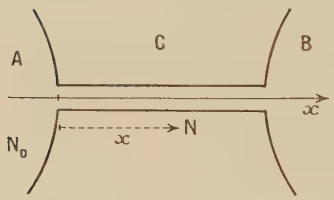


Fig. 17.

Si nous désignons par D le coefficient de diffusion de ces molécules et par v la vitesse d'écoulement visqueux de la vapeur de B vers A, le nombre n_0 des molécules du corps volatil qui traversent par seconde dans le sens des x croissants, l'unité de surface d'un plan P normal à la conduite C est :

$$n_0 = -D \frac{dN}{dx} + vN. \tag{7}$$

La variation relative de pression le long de C est faible et nous pouvons considérer D et v comme des constantes. On obtient alors en intégrant :

$$N = \left[-\frac{n_0}{D} \int_0^x e^{-\frac{v}{D}x} + C \right] e^{\frac{v}{D}x} = \frac{n_0}{v} + Ce^{\frac{v}{D}x}.$$

En tenant compte des conditions aux limites on a :

$$n_0 = N_0 v \frac{1}{1 - e^{-\frac{v}{D}l}}. \tag{8}$$

Enfin, si s est la section de la conduite C, le nombre ν de molécules du corps volatil qui quittent par seconde la chambre A est :

$$\nu = n_0 s = N_0 s v \frac{1}{1 - e^{-\frac{v}{D}l}}. \tag{9}$$

Les formules (2), (6) et (9) permettent de choisir le diamètre et la longueur de la conduite C pour que la diffusion du corps volatil de A vers B et la variation de volume des gouttes soient négligeables.

Variation de température de gouttes. — Le débit de vapeur d'eau, comme dans la méthode originale, est proportionnel à la différence de tension de vapeur ΔP entre les deux gouttes (formule 6). L'évaporation ou la condensation qui résultent de cet écoulement de vapeur mettent en jeu une quantité de chaleur Q elle-même proportionnelle à ΔP (1).

Et si la température de l'une des gouttes est maintenue à la température T_0 du thermostat, le régime stable qui s'établit est défini par l'égalité :

$$B(\Delta P_0 - \beta P_0 \Delta T) = A\Delta T \ (2),$$

c'est-à-dire que la relation (1) de la méthode originale est toujours valable :

$$\Delta T = \frac{\Delta P_0}{A/B + \beta P_0}.$$

Remarque. — Au moment où l'écoulement de vapeur commence, les deux gouttes sont à la même température T_0 ; la différence de pression entre les deux chambres est égale à l'abaissement de tension

(1) Le coefficient B de proportionnalité entre la chaleur d'évaporation de l'eau et la différence de pression entre les deux chambres se déduit de la relation (6) :

$$B = Q/\Delta P = Lm/\Delta P = 5{,}5.10^{-3} L \frac{d^4}{l} \qquad (11)$$

où L est la chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température du thermostat.

(2) Le coefficient d'échange de chaleur A entre la goutte d'eau pure et le boîtier a même expression que dans la méthode originale :

$$A = \frac{Q'}{\Delta T} = \frac{4\pi K r_1 r_0}{r_0 - r_1} + 16\pi r_1^2 T_0^3 \sigma + \frac{2ks_1}{l_1} \qquad (12)$$

où : r_0 est le rayon de la chambre, r_1 celui de la goutte.

K le coefficient de conductibilité thermique de la vapeur contenue dans la chambre.

σ la constante de Stefan, relative aux pertes par rayonnement.

k le coefficient de conduction thermique des métaux constituant le thermocouple sur lequel est déposée la goutte.

s_1 et l_1 la section et la longueur des fils du thermocouple.

de vapeur ΔP_0 de la solution à cette température et la masse de vapeur qui s'écoule par seconde est m_i défini par (6). Lorsque l'équilibre thermique est atteint, la différence de pression entre les deux chambres est :

$$\Delta P_e = \Delta P = \Delta P_0 - \beta P_0 \Delta T \qquad (13)$$

et la masse de vapeur qui s'écoule alors par seconde se réduit à :

$$m_e = m_i \frac{A/B}{A/B + \beta P_0}. \qquad (14)$$

Vérification expérimentale. — Pour confirmer les résultats de cette étude, nous avons construit un appareil présentant les caractéristiques suivantes :

$$\begin{cases} l = 0{,}5 \text{ cm.} & d = 0{,}01 \text{ cm.} \\ k = 0{,}054 \text{ (fils de manganine et de constantan)} \\ s_1 = \pi(0{,}0025)^2 & l_1 = 0{,}7 \\ r_0 = 0{,}5 \text{ cm.} & r_1 = 0{,}07 \text{ cm.} \end{cases}$$

D'autre part, nous avons à 20° C :

$$\begin{cases} T_0 = 293 \\ K = 4{,}3 . 10^{-5} \\ \beta = 62{,}2 . 10^{-3} \\ \sigma = 0{,}9 . 10^{-12} \end{cases}$$

Le coefficient A, défini par la relation (12), est alors :

$$A = \frac{Q'}{\Delta T} = 5{,}3 . 10^{-5}.$$

Le coefficient B, donné par la formule (11), a pour valeur :

$$B = \frac{Q}{\Delta P} = 5{,}5 . 10^{-3} \, L \frac{d^4}{l} = 6{,}5 . 10^{-8}.$$

Enfin, $P_0 = 1{,}74 \times 13{,}6 \times 980 = 2{,}3 . 10^4$ baryes et la formule (10) devient numériquement :

$$\Delta T = \frac{\Delta P_0}{A/B + \beta P_0} = \frac{\Delta P_0}{0{,}81 + 1{,}45} \, 10^{-3}$$

Un abaissement de tension de vapeur $\Delta P_0 = 0{,}001 \; P_0 = 23{,}2$ baryes, détermine une différence de température de $\Delta T = 0°01$.

Description. — La figure 18 représente le dispositif utilisé. Au centre des chambres C_1 et C_2 se trouvent les soudures s_1 et s_2 du thermocouple. La conduite capillaire est figurée en P. Pour mettre en place les gouttes, on dévisse les pièces P_1 et P_2.

On dispose ensuite un peu de vacoplast dans les gorges r_1 et r_2 pour assurer l'étanchéité. L'air est rapidement évacué et le dispositif

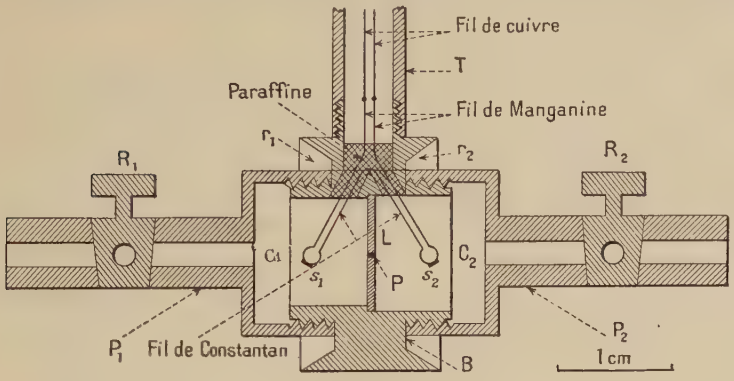


Fig. 18.

est immergé dans le thermostat dont la température est maintenue constante à 0°002 près.

Le galvanomètre à cristal muni du cadre couplé utilisé pour les

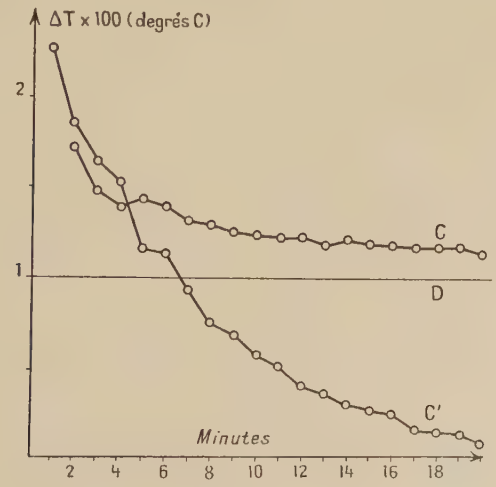


Fig. 19.

mesures a une sensibilité de 9.10^{-9} V/mm./m. Il est étalonné directement en degrés : 1 mm. de la règle graduée placée à 118 cm. correspond à une différence de 210^{-4} degré entre les deux soudures du thermocouple.

La courbe C, sur la figure 19, représente, en fonction du temps, les valeurs de ΔT obtenues avec une goutte d'eau lourde de concentration 0,007 en molécules D_2O ; la valeur calculée pour ΔT (0°01) est représentée par la droite D.

L'amélioration des conditions expérimentales doit permettre de se rapprocher davantage encore des résultats de l'étude théorique. Mais déjà, si on compare la courbe C à la courbe C′ obtenue dans les mêmes conditions avec le dispositif original (fig. 19), on peut se rendre compte que cette méthode constitue un perfectionnement susceptible d'étendre le domaine d'application de la micro-méthode thermoélectrique de Hill-Baldes.

CONCLUSIONS

Nous avons consacré la première partie de ce travail à une étude générale des conditions de sensibilité des galvanomètres à cadre mobile. Quelques expressions utiles ont été proposées, en particulier celles de la sensibilité « interne » à la tension ou à la puissance et celles de la sensibilité en fonction des dimensions du cadre. Nous avons montré les difficultés de réalisation des couples directeurs très faibles et étudié l'influence de la forme du cadre et de celle du miroir. Enfin, après avoir souligné l'importance des défauts magnétiques « parasites », nous avons abordé le problème de la multiplication de la sensibilité et rappelé la limite imposée par les fluctuations browniennes du spot.

Un galvanomètre de type nouveau a été réalisé au laboratoire. Il est à la fois très sensible à la tension (0,03 microvolt/mm./1 m.), et très robuste parce que son ruban de suspension est celui d'un galvanomètre classique dix fois moins sensible. En outre, le couple directeur peut varier dans de larges limites ce qui permet d'adapter la sensibilité, l'amortissement et la période à diverses conditions de mesure.

Nous avons ensuite étudié et construit un dispositif, appelé cadre couplé, adaptable à tout galvanomètre, et qui permet de régler à volonté le régime des oscillations sans introduire aucune perturbation dans le circuit de mesure. On peut ainsi utiliser des flux magnétiques beaucoup plus intenses sans accroître la résistance critique de l'appareil.

Enfin, nous avons utilisé ces galvanomètres sensibles pour préciser les conditions électriques d'apparition de la galvanonarcose et pour étudier deux nouveaux dispositifs de mesure des pressions osmotiques.

Qu'il me soit permis, au terme de ce travail, de dire tout le plaisir et le bénéfice que j'ai retirés de la fréquentation du laboratoire pendant plusieurs années. Les conversations fructueuses avec les chercheurs amis, la collaboration intelligente et dévouée des techniciens — tout particulièrement celle de M. L. Durrieu dont l'habileté manuelle a été si précieuse pour la construction délicate des équipages mobiles — m'ont apporté une aide inestimable tant par leur contribution directe à l'élaboration du présent travail que par l'atmosphère de cordiale sympathie qu'elles n'ont cessé de maintenir au sein du Laboratoire.

Je désire enfin remercier M. le Directeur du Centre National de la Recherche scientifique pour les crédits qu'il a bien voulu m'allouer, ce qui m'a permis d'acquérir une partie du matériel nécessaire.

BIBLIOGRAPHIE

1. Ayrton, Mather, Sumpner. — *Proc. Phys. Soc.*, 1890, **10**, 393.
2. J. Bernamont. — *Ann. de Phys. Paris*, 1937, **7**, 71.
3. British Scient. Inst. Res. Assoc., 1924, R **29**.
4. H. B. Brooks. — Bur. Stand. J. Res., 1930, **4**, 297.
5. A. Christy. — *Rev. of Sc. Inst.*, 1936, **7**, 93.
6 F. Combes. — Dipl. Et. Sup. Toulouse, 1942.
7. F. W. Constant. — *Phys. Rev.*, 1943, **63**, 441.
8. J. Coursaget. — *C. R. Acad. Sc.*, 1948, **227**, 673.
9. M. Deprez. — *Lum. Elect.*, 1881, **4**, 310.
10. Deprez, d'Arsonval. — *C. R. Acad. Sc.*, 1882, **94**, 1342.
11. Hill, Downing. — *J. Sc. Inst.*, 1925, **2**, 255.
12. Hill, Downing. — *J. Sc. Inst*, 1926, **3**, 335.
13. A. C. Downing. — *J. Sc. Inst.*, 1935, **11**, n° 9.
14. A. C. Downing. — *Sc. Inst. et Phys. Ind.*, 1948, **25**, 230.
15. G. Dupouy. — *Ann. de Phys. Paris*, 1931, **15**, 495.
16. G. Dupouy. — *C. R. Acad. Sc.*, 1947, **225**, 1290.
17. F. A. Firestone. — *Rev. of Sc. Inst.*, 1932, **3**, 163.
18. D. H. Follett. — *Nature*, 1935, **135**, 187.
19. M. Fouretier. — (Conférence) App. de mesure, 1943, **1**, 43.
20. Fournier. — *C. R. Acad. Sc.*, 1947, **227**, 833.
21. General Electric Co. — CDM-1, CDM-2, 1947.
22. A. V. Hill. — *J. Sc. Inst.*, 1931, **8**, 262.
23. A. V. Hill. — *J. Sc. Inst.*, 1934, **11**, 246.
24. A. V. Hill. — *Nature*, 1934, **134**, 289.
25. A. V. Hill. — *J. Sc. Inst.*, 1935, **12**, 91.
26. A. V. Hill. — *Proc. Physiol. Soc.*, 1938, **92**, 43P.
27. A. V. Hill. — *J. Sc. Inst.*, 1948, **25**, 225.
28. E. Hochard. — *Thèse Paris*, 1935.
29. G. Ising. — *Phil. Mag.*, 1926, **1**, 827.
30. G. Ising. — *Annalen der Physik*, 1932, **14**, 755.
31. W. Jæger. — *Zeit. für Instrumentenkunde*, 1903, **23**, 261.
32. W. Jæger. — *Zeit. für Instrumentenkunde*, 1903, **23**, 353.
33. J. H. Jeffree. — *Phil. Mag.*, 1932, **14**, 360.
34. R. V. Jones. — *J. Sc. Inst.*, 1934, **11**, 302.
35. P. E. Klopsteg. — *Phys. Rev.*, 1916, **7**, 633.
36. P. E. Klopsteg. — *Phys. Rev.*, 1916, **8**, 195.
37. Mather. — *Proc. Phys. Soc.*, 1890, **10**, 326.
38. M. Michel. — *C. R. Acad. Sc.*, 1929, **189**, 1257.
39. W. J. H. Moll. — *Proc. Phys. Soc.*, 1923, **35**, 253.
40. Moll, Burger. — *Phil. Mag.*, 1925, **50**, 624.
41. Navier. — Cours Ecole des Ponts et Chaussées, 1840.
42. Ornstein, Burger, Taylor, Clarkson. — *Proc. Roy. Soc.*, 1927, A **115**, 391.
43. Pompeo, Penther. — *Rev. Sc. Inst.*, 1942, **13**, 218.
44. Pyle, Lindley. — *Phys. Rev.*, 1915, **6**, 446.

45. R. Saporte. — Dipl. Et. Sup. Phys., Toulouse, 1942.
46. O. H. Schmitt. — *J. Sc. Inst.*, 1938, **15**, n° 7.
47. Von Smoluchowsky. — *Phys Zeits.*, 1912, **13**, 1069.
48. J. Strong. — *Rev. Mod. Phys.*, 1948, **20**, 180.
49. M. Surdin. — *Journal de Phys.*, 1949, **10**, 253.
50. G. A. Van Lear. — *Rev. Sc. Inst.*, 1933, **4**, 21.
51. V. Voss. — *J. Sc. Inst.*, 1938, **15**, 26.
52. W. L. Walton. — *J. Sc. Inst.*, 1935, **12**, 115.
53. E. Wenner. — *Bull. Bur. St.*, 1909, **6**, 347.
54. R. S. Whipple. — *J. Sc. Inst.*, 1934, **11**, n° 2.
55. W. P. White. — *Phys. Rev.*, 1904, **19**, 304.
56. W. P. White. — *Phys. Rev.*, 1906, **22**, 371.
57. W. P. White. — *Phys. Rev.*, 1906, **23**, 382.
58. A. G. Worthing. — *Phys. Rev.*, 1915, **6**, 165.
59. F. Zernicke. — *Proc. Acad. Sc. Amsterdam*, 1921, **24**, 239.

60. E. Altenkirch. — *Zeitschr. f. gesamte kalte Ind.*, 1912, **19**, 1.
61. d'Arsonval. — *Annales de Phys. et de Chim.*, août 1902.
62. R. Auvergnat. — *Thèse de Sciences*, Toulouse, 1947.
63. Bentner. — *J. Pharmacolog* , 1931, **42**, 258.
64. C. Bounes, L. Bugnard, H. Fishgold et P. Marques. — La galvanonarcose utilisée comme test pharmacologique. Expériences non publiées.
65. E. Gelhorn et J. Régnier. — *La perméabilité en physiologie et en pathologie générale*, Masson, 1938.
66. Lenz. — *Poggendorf Annalen*, 1839, **44**, 342.
67. Peltier. — *Annales de Phys. et de Chim.*, 1834, **56**, 371.
68. R. R. Roepke. — *J. Phys. Chemistry*, 1942, **46**, 359.
69. Scheminzky, Adler, Kraus, Reiffenstuhl, Hradecky et Köllensperger. *Tabulæ Biologicæ*, Pars 2, 1941, **19**, 170.
70. Von Scheminzky et K. Bukatsch. — *Tabulæ Biologicæ*, Pars 2, 1941, **19**, 76.
71. A. Strohl. — *Conductibilité et excitabilité électrique du nerf*, Masson, 1942.
72. Turrettini. — *Bull. Soc. Fr. des Electr.*, 1929, **9**, 1267.
73. J. Tyndall. — *Physiologic. Mag.*, décembre 1852 ; *Bibliothèque universelle de Genève*, 1852, **21**, 317.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

La détermination de l'âge de la terre au moyen de l'analyse isotopique du plomb.

VU ET APPROUVÉ :

Toulouse, le 22 novembre 1949.

Le Doyen, Président de la thèse,

G. DUPOUY

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Toulouse, le 22 novembre 1949,

Le Recteur,

Président du Conseil de l'Université,

P. DOTTIN

DÉPÔT LÉGAL : 1952, 1er TRIMESTRE, N° D'ORDRE 1516, MASSON ET Cie, ÉDITEURS, PARIS.
BARNÉOUD FRÈRES ET Cie, IMPRIMEURS (31.0566), LAVAL, N° 2486. — 1-1952.